



STRUKTURNÍ ANALÝZA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S TKANINOVOU ANORGANICKOU VÝZTUŽÍ

Diplomová práce

Studijní program: N3957 – Průmyslové inženýrství
Studijní obor: 3901T073 – Produktové inženýrství
Autor práce: **Bc. Martina Sůvová**
Vedoucí práce: Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Textile Engineering



STRUCTURAL ANALYSIS OF COMPOSITE MATERIALS WITH WOVEN INORGANIC REINFORCEMENT

Diploma thesis

Study programme: N3957 – Industrial Engineering
Study branch: 3901T073 – Product Engineering
Author: **Bc. Martina Šůvová**
Supervisor: Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martina Sůvová**
Osobní číslo: **T12000480**
Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**
Studijní obor: **Produktové inženýrství**
Název tématu: **Strukturní analýza kompozitních materiálů s tkaninovou anorganickou výztuží**
Zadávající katedra: **Katedra hodnocení textilií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte literární rešerši z oblasti kompozitních materiálů (dělení, výroba, ?). Zaměřte se na kompozitní materiály s anorganickou výztuží. Popište strukturu kompozitu.
2. V experimentální části vytvořte tzv. tvrdé řezy kompozitů ze sady kompozitů se skleněnou tkaninovou výztuží. Pomocí obrazové analýzy proveďte strukturní analýzu kompozitů.
3. Vyhodnoťte vliv vazby, tlaku, počtu vrstev a teploty při výrobě, na výslednou strukturu kompozitu. Pro vyhodnocení zvolte vhodnou statistickou metodu. Dosažené výsledky shrňte a interpretujte.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **50 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**M. Meloun, J. Militký: Statistická analýza experimentálních dat;
Praha, Academia, 2004**

**J. Salačová: Možnosti počítačového vidění reálné struktury tkaninových
kompozitů, DisP, TUL 2003**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.
Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

20. ledna 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

8. ledna 2015


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka




doc. Ing. Vladimír Bajžík, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 12. prosince 2014

P r o h l á š e n í

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

P o d ě k o v á n í

Na tomto místě bych ráda poděkovala Ing. Miroslavě Pechočiakové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a vstřícnost při tvorbě této práce, paní Ing. Janě Salačové, Ph.D. za ochotu při provádění měření, a své rodině za duševní a materiální podporu v průběhu celého studia.

A b s t r a k t

Předložená diplomová práce se zabývá vlivem vazby tkaninové výztuže, tlaku při výrobě, počtu vrstev výztuže a teplotou při výrobě na výslednou strukturu kompozitu.

V teoretické části popisuje druhy kompozitních materiálů a jejich rozdělení, metody výroby, druhy vyztužujících vláken a strukturu kompozitu.

V experimentální části je diplomová práce zaměřena na výrobu tzv. tvrdých řezů kompozitů s tkaninovou skleněnou výztuží. Na těchto řezech byla provedena strukturní analýza nábrusů pomocí obrazové analýzy. Dosažené výsledky byly statisticky zpracovány.

Klíčová slova

kompozitní materiály, tkaninová výztuž, skleněná vlákna, příčný řez, strukturní analýza

A b s t r a c t

The present thesis deals with the influence of the binding woven reinforcement, the pressure in the production, the number of reinforcement layers and the temperature in the production of the resulting composite structure.

The theoretical part describes types of composite materials and their distribution, manufacturing methods, types of reinforcing fibers and composite structure.

In the experimental part of the thesis focuses on the production of so-called. Hard cuts composites with glass fabric reinforcement. On these sections was carried out structural analysis of polished cross sections by image analysis. The results were statistically analyzed.

Keywords

composite materials, woven reinforcement, glass fibers, cross-sectional, structural analysis

Obsah

1. ÚVOD.....	11
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	12
2.1 Kompozitní materiály.....	12
2.1.1 Dělení kompozitních materiálů.....	13
2.1.2 Technologie výroby kompozitů.....	14
2.1.3 Druhy výztužných materiálů.....	23
2.1.4 Vazby tkanin pro kompozity.....	24
2.1.5 Anorganická vlákna pro kompozity.....	26
Vlastnosti skleněných vláken - shrnutí.....	32
2.2 Struktura kompozitu.....	38
2.2.1 Strukturní úrovně v kompozitu.....	38
2.2.2 Strukturní defekty.....	39
2.2.3 Klasifikace defektů ve struktuře kompozitu.....	40
2.3 Počítačová analýza obrazu.....	42
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	44
3.1 Použité přístroje.....	44
3.2 Popis vzorků.....	45
3.3 Popis přípravy.....	47
3.4 Popis zkoušek.....	50
4. VÝSKEDKY A DISKUSE.....	53
4.1 Plošný podíl pórů.....	59
4.2 Závislost tlaku při výrobě na podíl pórů v kompozitu.....	63
4.3 Závislost teploty při výrobě na podíl pórů v kompozitu.....	66
4.4 Statistická závislost – analýza rozptylu (ANOVA).....	68
4.5 Leveneův test (test variability).....	71

4.6	Funkční závislost - ověření hypotézy dvouvýběrovým t-testem	74
4.7	Kruskal – Wallisův test (test shody mediánů)	80
5.	ZÁVĚR.....	83
	Příloha.....	89

Seznam použitých symbolů a zkratk

k	optimální počet intervalů
Me	střední hodnota,
n	počet různých hodnot znaku, jež jsou k dispozici
P	podíl pórů v kompozitu
PEEK	polyéteréterketon
PEI	polyéterimid
PPS	polyfenylensulfid
Sc	celková měřená plocha
Sp	plochy pórů
s	směrodatná odchylka
v	variační koeficient
Y_i	hodnoty druhého výběru
X_i	hodnoty prvního výběru
\bar{X}	aritmetický průměr
95% IS	odhad pro 95% interval spolehlivosti
σ^2	rozptyl
μ	průměr

1. ÚVOD

V současné době můžeme sledovat prudký rozmach výroby kompozitních materiálů a jejich aplikací v konstrukčních prvcích, v automobilovém, chemickém a leteckém průmyslu.

Tato práce se věnuje kompozitům složeným ze skleněných vláken v tkaninové výztuži a pryskyřicové matrice. Vlastnosti těchto druhů kompozit jsou velmi rozmanité. Závisí nejen na druhu skleněných vláken, ale i na typu výztuže, jejím objemovém podílu, ale také na druhu prekurzoru matrice a především na podmínkách výroby, jako je například tlak při lisování vrstev výztuže nebo teplota vytvrzení kompozit. Struktura kompozit je poměrně složitá, převážně mnohastupňová. Kvalita kompozitů úzce souvisí s podílem pórů v kompozitu, ten ovlivňuje jeho další požadované vlastnosti. Systém pórů a trhlin v kompozitu má z hlediska výroby a podle následného použití kompozitů své výhody i nevýhody. Otevřené póry například umožňují vhodnou reakci jejich povrchu s buňkami v případě využití kompozitu jako biomateriálu. Otevřené póry a trhliny je možné dále impregnovat. Zásadní problém nastává u tzv. delaminačních trhlin na styčných plochách jednotlivých vrstev použité textilie, které mohou být rozsáhlé a vést k úplnému rozpadnutí kompozitu i při minimálním zatížení.

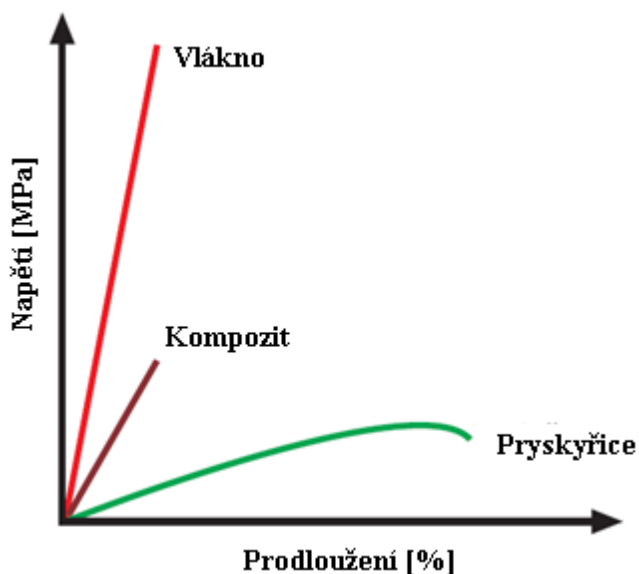
Cílem této práce je ověřit vliv vazby, tlaku, počtu vrstev výztuže a teploty na výslednou strukturu kompozitu.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek (fází). Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka se nazývá **výztuž**. [1] Složka, která je v celém rozsahu spojitá a určuje tvar a rozměr kompozitu (drží ho pohromadě) – tuto složku označujeme jako **matrice**. Všechny ostatní složky kompozitu, které jsou zpravidla v matici rozptýleny – dispergovány, označujeme jako **disperze**. [2]

Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou vyšší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek, viz obrázek 2. 1. Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností. [3]



Obr. 2. 1 Tahový diagram [4]

Podle současného chápání pojmu kompozit musí být k zařazení vícefázového materiálu mezi kompozitní materiály splněny následující podmínky:

- podíl výztuže musí být větší než 5 % (neplatí pro nanokompozity)
- vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice
- kompozit musí být připraven smícháním složek [1]

2.1.1 Dělení kompozitních materiálů

a) podle disperzní fáze

I když je nejběžnější případ, že disperze tvoří pevná fáze, obecné definice kompozitu to nevyžadují. Proto je možné kompozity rozdělit na tři základní typy:

- **Kompozit prvního typu** má disperze (jednu nebo více) z pevné fáze. Tyto kompozity se používají v technice nejčastěji.
- **Kompozit druhého typu** má kapalnou disperzi. Tento druh není příliš častý, kapalina může být v uzavřených pórech nebo otevřených. Např. dřevo
- **Kompozit třetího typu** má plynnou disperzi. Patří sem všechny tzv. pěnové materiály, z nich jsou dnes velmi moderní různé kovové pěny.

b) Podle typu matrice

- Kompozitní materiály s plastovou matricí
- Kompozitní materiály s kovovou matricí
- Kompozitní materiály s keramickou matricí

Kompozity se skleněnou matricí do tohoto rozdělení zcela nezapadají, ale pro podobné vlastnosti se zařazují ke kompozitním materiálům s keramickou matricí.

c) Podle tvaru disperze

Tvar jednotlivých částí disperze se podstatně podílí na anizotropii vlastností i na způsobu interakce mezi matricí a disperzí.

1) Částicové, disperze ve tvaru částic, buď:

- (a) **Izotermických** – kompozit je zpravidla izotropní
- (b) **Neizotermických**, především destiček nebo jehliček, mohou být
 - (i) náhodně orientované
 - (ii) orientované

2) Vlákenné, disperze je ve tvaru vláken (převládá podélný rozměr, vlákna nemají ohybovou tuhost)

- a) **Spojité vlákna** – vlákna nejsou uvnitř kompozitu přerušena
 - i) Jednoosé uspořádání

- ii) Dvojosé uspořádání – často tkanina nebo pletenina,
- b) **Dlouhá vlákna** – jsou delší než kritická délka, při lomu se přetrhnou
 - i) Jednoosé uspořádání
 - ii) Dvojosé uspořádání – náhodně rozložena v rovině
 - iii) Trojosé uspořádání – náhodně rozložena v prostoru
- c) **Krátká vlákna** – jsou kratší než kritická délka, při lomu se vytáhnou
 - i) Jednoosé uspořádání
 - ii) Dvojosé uspořádání – náhodně rozložena v rovině
 - iii) Trojosé uspořádání – náhodně rozložena v prostoru.[2]

2.1.2 Technologie výroby kompozitů

Základní dělení všech technologií je možné provést podle formy. Je to jednak otevřená (jednodílná), jednak uzavřená forma. Typ formy rozhoduje o odpařování reaktivního ředidla pryskyřice levných UP, (“Unsaturated Polyester”) a VE (“Vinyl Ester”) pryskyřic.

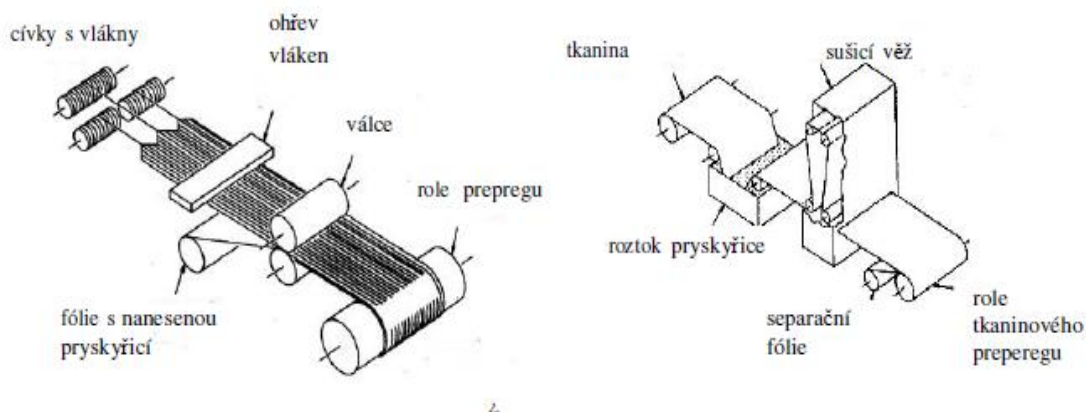
Ruční kladení za mokra

Ručním kladením výztuže na otevřenou formu lze vyrobit i velmi rozměrné výrobky. Výztuž musí být v podobě tkaniny nebo rohože, pryskyřice při teplotě výroby musí téci. Prosycování výztuže tekutou pryskyřicí je prováděno ručně (pomocí štětce, stěrky nebo válečku).

Odpařování reaktivního rozpouštědla u UP a VE pryskyřic ovzduší je možno potlačit použitím pryskyřic s vosky, vytvářejícími na povrchu stojící pryskyřice nepropustnou vrstvu (pryskyřice se sníženou emisí rozpouštědla). Při prosycování výztuže je však účinek vosku zanedbatelný. Vyrobené díly s UP pryskyřicemi se vytvrzují nejčastěji za studena, tj. při pokojové teplotě a dotvrzují za zvýšené teploty (80 °C). Ruční kladení za mokra s UP pryskyřicí lze použít pouze tehdy, neklesne-li teplota pod 15°C. Proces vytvrzování závisí na použitém vytvrzovací systému. Dobu do želatinování pryskyřice (“gel time”) lze zmenšit použitím urychlovače. [1]

Výroba reaktoplastických prepregů

Při výrobě tkaninových prepregů je preferován mokrý způsob, kdy tkanina je namáčena do roztoku pryskyřice viz obr. 2. 2.



Obr. 2.2 Mokrý způsob výroby kompozitů [1]

U vícevrstvých prepregů se zvětšení odolnosti proti delaminaci dosáhne vzájemným spojením vrstev.

Ruční kladení prepregů, vytvrzování v autoklávu

Jde o technologii vhodnou pro kusovou výrobu mechanicky namáhaných kompozitových dílů. Do otevřené formy opatřené vrstvou separátoru nebo neporézní fólií je vložena odtrhová vrstva z tkaniny z vláken PET, PA nebo skla E. Tato vrstva chrání povrch kompozitu před znečištěním a je snímána před lepením nebo barvením.

Dále jsou podle zvolené skladby laminátu do formy pokládány orientované nařezané prepregy. Aby se zvětšila lepivost prepregů, je možno je nahřívat horkým vzduchem (lze použít fén na vlasy). Po položení potřebného počtu vrstev je na vrchní vrstvu dílu položena opět odtrhová vrstva a poté vrstva umožňující průnik přebytečné pryskyřice do odsávací vrstvy (děrovaná fólie nebo tkanina).

Odsávací vrstva má za úkol odsát přebytečnou pryskyřici (anglicky “bleeder”) a je obvykle vyrobena jako rohož z polymerních vláken (PET), snášejících teplotu

vytvrzování. Stejnou funkci splňuje i jemná skleněná rohož nebo tkanina. Odsávací vrstva je překryta prodyšnou fólií (perforovaný film, viz obrázek u technologie VBM), na ní jsou položeny odvzdušňovací vrstvy z polymerní nebo skelné rohože (eventuálně tkaniny), umožňující odsátí vzduchu (anglicky “breather”). Hermetičnost prostoru zajišťuje polymerní fólie (obvykle z PA) nebo pro opakované použití elastomerní vak ze silikonového kaučuku. V tlakové nádobě, tzv. autoklávu, je provedeno vakuování dílu. Po odsátí vzduchu z vaku přitlačuje jednotlivé vrstvy atmosférický tlak. Po ohřátí autoklávu na požadovanou teplotu nastane vytvrzování pryskyřice (120° až 200°C). Vyvozením přetlaku v autoklávu se ještě lépe přitlačí vrstvy prepregů k sobě a je tak zaručen minimální obsah pryskyřice (přetlak je v desetinách MPa). Doba působení teploty a přetlaku se volí podle rychlosti vytvrzování pryskyřice (dáno digramem TTT (“Temperature-Time-Transformation”)). Chladnutí dílu musí být pomalé, aby mohla relaxovat vnitřní pnutí v laminátu, vzniklá rozdílnou tepelnou roztažností složek kompozitu i různě orientovaných vrstev. Zvláštní pozornost režimu vytvrzování je zapotřebí věnovat při výrobě tlustostěnných dílů. Při větší tloušťce laminátu může dojít v důsledku exotermické reakce, doprovázející vytvrzování pryskyřice, k přehřátí středních vrstev laminátu (i při použití epoxidových pryskyřic) a k poklesu jejich mechanických vlastností (tepelná degradace pryskyřice a vznik pórů v matici).

Mikrovlnný ohřev (RF (“Radio Frequency”) ohřev)

Mikrovlnný ohřev umožňuje lepší kontrolu teploty při menší spotřebě energie (o 80 % menší spotřeba oproti autoklávu). Proces vytvrzování pryskyřice kompozitu je i rychlejší (o 40 % kratší cyklus než u autoklávu). Zařízení pro mikrovlnný ohřev (například pec Hephaistos od firmy Vötsch Industrietechnik GmbH) by proto mohlo nahradit dražší autoklávy. Kovy se mikrovlnným zářením neohřívají a působí jako reflektory. Některé transparentní nekovové materiály se také neohřívají (například sklo a skleněná vlákna). Použitím kombinace materiálů je možné vytvořit nástroj, v němž se mikrovlny soustředí pouze na ohřev pryskyřice kompozitu. Další materiály mají rozdílnou schopnost pohlcovat mikrovlny. Běžně používané odvzdušňovací vrstvy, vaky a těsnění však mikrovlny absorbují. Pro mikrovlnný ohřev je proto vhodný pouze vak z polyimidu (PI), který je tepelně stabilní a přitom absorbuje poměrně malé

množství energie. Například Upilex (levnější než starší Kapton) má tepelnou odolnost až 350°C. [1,5]

ATP (“Automated Tape Laying”), strojní kladení prepregů

Jde o technologie s použitím kladecích strojů. Rozeznávají se: FTLM (“Flat Tape Layer Machine”) a CTLM (“Contour Tape Layer Machine”). Počítačem řízené kladecí stroje jsou vybaveny kladecí hlavou, která se pohybuje nad otevřenou formou a má dostatečný počet stupňů volnosti. Kladecí hlava sejme separační fólii, předeheje prepreg (prepreg s reaktoplastickou matricí) a kladkou jej přitiskne k předchozím vrstvám. Pro reaktoplastické matrice, zpracovávané při mírně zvýšených teplotách, vyhovuje kladka tvořená polyethylenovými disky, na které se pryskyřice v B stavu nelepí. Na konci jedné položené stopy kladecí hlava prepreg odřízne. Tloušťka dílů může být značná (například tloušťka povrchu křídla vojenského letounu F 22 v místě upevnění k trupu činí 15 mm, tj. je tvořena 120 vrstvami). Proces strojního kladení je značně rychlý (oproti ručnímu kladení časově úspornější a tedy i levnější) a vylučuje selhání člověka (zvolená orientace jednotlivých vrstev je zaručena).[1]

Strojní kladení termoplastických prepregů

V poslední době vzrůstá používání termoplastů jako matrice pro vysokopevnostní kompozity zejména z následujících důvodů:

- materiály vykazují v porovnání s termosety vyšší houževnatost,
- mají prakticky neomezenou dobu skladovatelnosti bez chlazení,
- je možné tepelné dotvarování a spojování svařováním,
- mají krátkou dobu zpracování (neprobíhá žádná chemická vytvrzovací reakce),
- je možná aplikace pro vysoké teploty při použití materiálů jako PEEK, PS nebo PEI pro matrice s vysokou teplotou skelného přechodu 150 až 300 °C a teplotou taveniny 300 až 410 °C,
- v porovnání s termosety jsou vzhledem ke své tavitelnosti jednodušejí recyklovatelné.

Jejich nevýhody spočívají převážně v materiálových vlastnostech:

- nižší modul pružnosti a pevnosti v tlaku,
- vyšší sklon k tečení (krípu), zejména při zvýšené teplotě,
- nižší přilnavost prosycování vláken vzhledem k vysoké viskozitě matrice,
- vyšší teploty a tlaky při zpracování.

Termoplasty vyztužené dlouhými vlákny se používají zejména v automobilovém průmyslu, kde vykazují v porovnání s nevyztuženými plasty vysokou hodnotu tuhosti k hmotnosti (tzv. měrná tuhost), dobrou odolnost proti nárazu, přibližně stejné možnosti tváření, a tím i vysokou možnost uplatnění. [5]

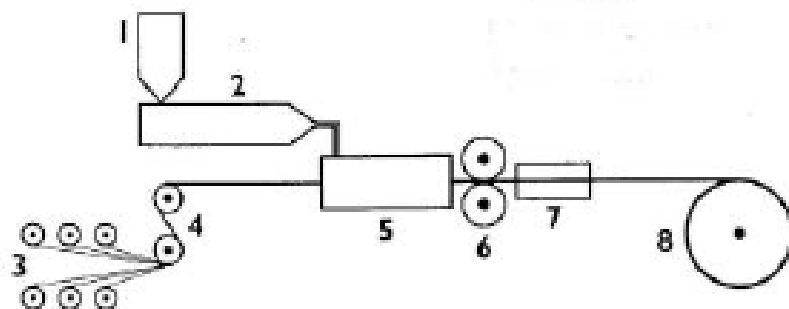
Termoplastickou maticí je nutno roztavit, aby došlo k spojení nové vrstvy s předchozími vrstvami.

Metody přípravy termoplastických prepregů

Při výrobě termoplastických prepregů lze spojení kontinuálních vláken s termoplastem provést metodou:

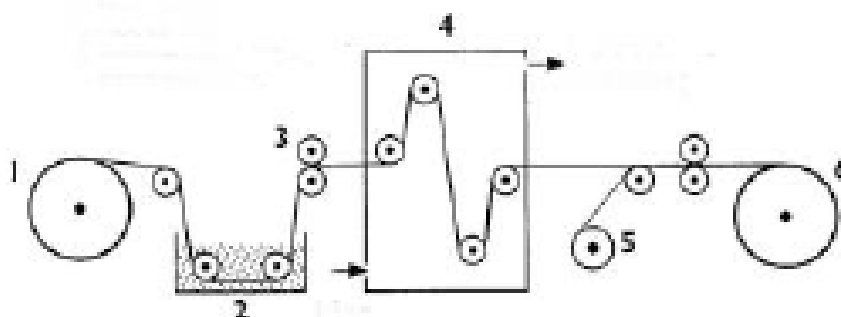
1. předimpregnace pramenců vláken taveninou polymeru v hubici vytlačovacího stroje (extrudéru). Tento způsob umožňuje výrobu pouze užších pásů prepregů
2. impregnace polotovarů roztokem polymeru
3. nanesení kapalně suspenze částic polymeru na výztuž
4. impregnace jednotlivých vláken suchým práškem polymeru (prášek je upoután na vlákno elektrostatickými silami a poté je slinut, takže termoplast pokryje povrch vlákna).

Na následujících obrázcích 2.3 až 2.5 jsou znázorněny hlavní technologie výroby termoplastických prepregů:



Obr. 2.3 Technologie 1 [1]

1- zásobník granulí termoplastu, 2- vytlačovací stroj se štěrbinovou hubicí, 3- cívky rovingů, 4- napínací kladky, 5- prosycování rovingů taveninou termoplastu, 6- válcování prepregu, 7- chlazení prepregu, 8- navíjení prepregu [1]



Obr. 2.4 Technologie 2 [1]

1- role tkaniny 2- prosycování tkaniny roztokem termoplastu, 3- vymačkávání přebytečné matrice, 4- sušicí věž, 5- separační fólie, 6- role tkaninového prepregů.

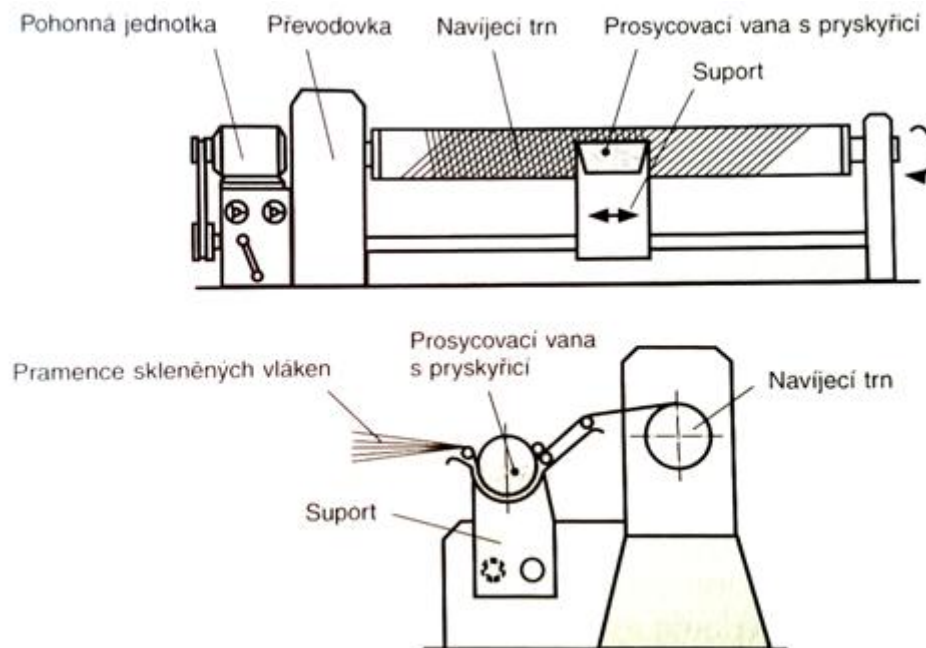


Obr. 2. 5 Technologie 3 - nanesení prášku a jeho slinutí [1]

Některé plasty mohou při technologii 2 dávat prepregy s určitou lepivostí, když si uchovávají zbytky rozpouštědla.

Navíjení šroubovicové za mokra

Stroje pro šroubovicové navíjení je možno přirovnat k soustruhům viz obrázek 2. 6. Navíjení rovingů smočených v pryskyřici (obvykle se v pryskyřici brodí pouze kotouč a přes jeho horní povrch se vedou vlákna) je používáno při výrobě rotačních i nerotačních nádob s konvexními povrchy (trubky a těla raket). Vhodné orientace vláken ve stěně nádoby je dosahováno volbou rychlosti posuvu kladecího ústrojí (vlákna procházejí tzv. „okem“) při dané rychlosti otáčení jádra (trnu). Vhodné množství pryskyřice je dosahováno průchodem namočeného rovingu „tryskou“, která přebytečnou pryskyřici odstraní (roving „vyždíme“) a volbou vhodného tahového napětí v navíjeném rovingu. [1]



Obr. 2.6 Navíjení na principu soustruhu [5]

Pro velké nádoby se používají zvláštní trny, které před snímáním výrobku sklopí dovnitř segmenty. U menších průměrů lze trn z výrobku vytlačit pomocí lisu. V případě, že je vyráběna tlaková nádoba (nádoby na stlačený plyn pro letadla), zůstává tzv. „liner” uvnitř nádoby a zaručuje těsnost nádoby. Mechanickou pevnost stěny nádoby zaručuje kompozit. Použití prepregů při technologii navíjení zaručuje reprodukovatelné mechanické vlastnosti výrobků. Termoplastické prepregy v podobě úzkého pásu jsou používány pro sportovní náčiní (golfové hole, rybářské pruty). Počítačem řízené navíjení předimpregnovaného rovingu s reaktoplastickou matricí je používáno např. při výrobě listů rotorů helikoptér.

Navíjení pólové za mokra

Stroje pro pólové navíjení používají otáčivou tenkostěnnou formu. Vlákná jsou nanášena ramenem, které se pohybuje okolo formy, takže vlákna jsou kladena i v oblasti pólů formy. (při šroubovicovém navíjení je nutno nádoby (s malou délkou při velkém průměru) uzavírat víky, které se vyrábějí zvlášť). Forma zůstává ve výrobku a funguje jako „liner”.

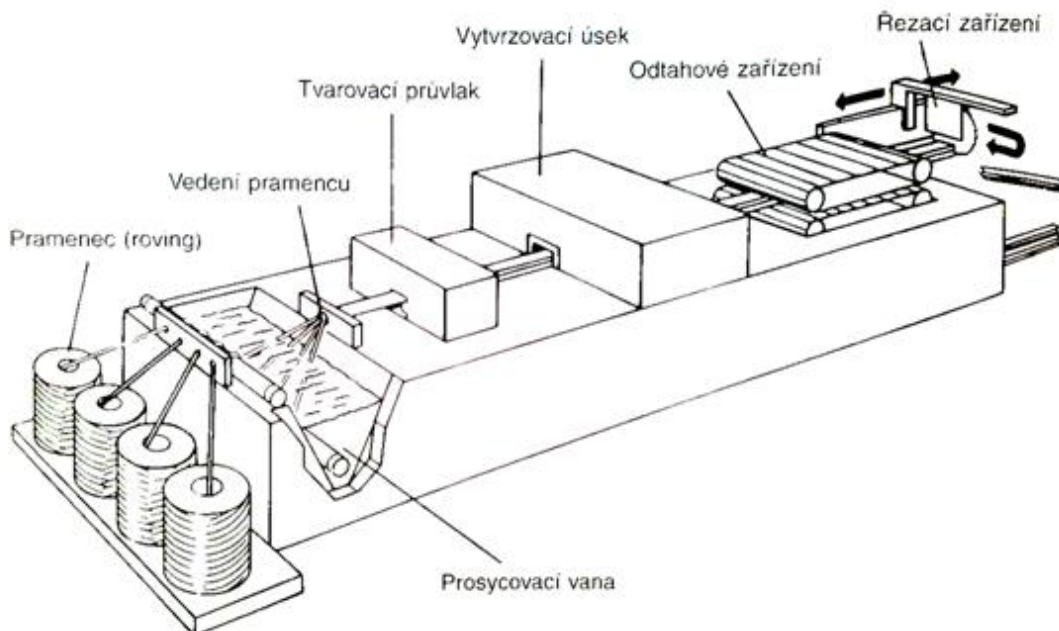
Axiální navíjení

K položení vláken v axiálním směru, které zvyšují odolnost výrobku při axiálním tlaku, lze použít zvláštní techniky v angličtině nazývané “pin supported winding”. Téměř axiálně položená vlákna jsou na koncích jádra držena systémem radiálních trnů. [1]

Pultruze

Profily s různým průřezem se kontinuálně vyrábějí technologií tažení (pultruze) obr. 2. 7.

Orientace vyztužujících vláken je určena technologií – vlákna jsou převážně rovnoběžná s podélnou osou profilu. Do procesu je možno zařadit i přídavná ovíjecí zařízení, které ukládá výztuž v obvodovém směru pod libovolným úhlem k podélné ose. V omezeném rozsahu je možno jako výztuže použít i pásy tkaniny. V prosycovací vaně se prameny vláken prosytí pryskyřicí. Tvarování (kalibrace a profilování) a současně i vytvrzování se provádí v průvlakem. Proto musí být používané pryskyřičné systémy velmi reaktivní, aby po průchodu průvlakem byl vytvrzený profil tvarově stálý. Dotvrzení pak probíhá v průběžné vytvrzovací komoře. [5]



Obr. 2.7 Tažení profilů [5]

Protože v kontinuálních výrobních procesech je vytvrzování součástí výrobní linky, potřebují tyto linky relativně dlouhé vytvrzovací úseky, což je určujícím faktorem pro velikost zařízení a jeho výkon. Pro dopravu, resp. pro formátování hotového taženého profilu, je nutno linku doplnit odtahovým zařízením a posuvným řezacím zařízením. [5]

Pro zvýšení smáčivosti vláken a lepší impregnaci výztuže pryskyřicí lze použít i ultrazvuk (UAP, “Ultrasonically Activated Pultrusion”) Nyní se pro pultruzi používají i prepregy a velmi kvalitní přímé i zakřivené profily je potom možno použít pro primární prvky letadel (Airbus A380). Pultruzí se vyrábějí i křídla bezpilotních letadel (KaZaK Composites Inc., USA). Pultruze prepegů s uhlíkovými vlákny a epoxidovou pryskyřicí je přetržitý proces, protože epoxidová pryskyřice pomaleji reaguje a profil se musí za tlaku nechat vytvrdit alespoň na 70%, aby mohl být v následující etapě odtahen. [1]

2.1.3 Druhy výztužných materiálů

Následující pojmy platí pro většinu typů vláken:

- **Příze** – vyrábí se spřádáním z vláken a zpracovává se dále na tkaniny, pásy a pletené výrobky
- **Nítě (skaná příze)** – vyrábějí se jedno- nebo vícestupňově, skládají se z jedné nebo více přízí, které jsou společně spředeny. Zpracovávají se dále podobně jako příze (ČSN EN ISO 2078)
- **Roving (pramenec)** – skládá se z 20 až 60 konců, sdružených z rovnoběžně uložených nestočených vláken nebo tažených přímo z taveniny (6 až 12000 elementárních vláken). Zpracovává se buď sekáním nebo tkaním, navíjením nebo tažením nekonečného pramence.
- **Spředený roving** – vyrábí se z vláken stočených kolem podélné osy.
- **Rohože ze sekaných pramenců** – netkané plošné výrobky o hmotnosti 300 až 900 g.m⁻². Vyrábějí se z 25 nebo 50 mm dlouhých sekaných vláken nepravidelně plošně uložených. Vlákna jsou uložena do vrstev, postříkána

pojivem a po vysušení v pásové sušárně spojena tak, že je možno vzniklo rohož, podobnou plsti, navíjet do rolí, které jsou připraveny pro okamžité další použití.

- **Rohože z kontinuálních vláken** – skládají se z nekonečných skleněných vláken, která jsou uložena nepravidelně bez jakékoliv orientace v smyčkách v několika vrstvách a jsou vzájemně spojena pojivem. Tvarují se lépe než rohože ze sekaných pramenců.
- **Povrchové (závojové) rohože** – netkané plošné výrobky o hmotnosti 20 až 50 g.m⁻² ze skleněných vláken nebo termoplastových vláken, které se pokládají do povrchové vrstvy laminátu s vysokým obsahem pryskyřice, aby se zamezilo vzniku trhlin. Zabraňují prorážení struktury hrubší výztuže na povrch a zesilují tenké vrstvy. Termoplastové povrchové rohože z polyetylentereftalátu (PET) nebo polyakrylonitrilu (PAN) se zvyšují odolnosti proti obrusu, jsou však při teplotě nad 40 °C citlivé na hydrolýzu a mají nízkou odolnost proti rozpouštědlům. Rohože z C- a ECR-skloviny dobře odolávají kyselým a alkalickým roztokům. Stejnou nebo lepší odolnost vykazují dobře provedené tenké vrstvy – gelcoaty – o tloušťce 0,3 až 0,6 mm.
- **Krátká vlákna** – mletá a na jednotlivá elementární vlákna rozptýlená vlákna o různé délce (0,1 až 5 mm), používaná pro vyztužení termoplastů.
- **Tkaniny** – plošné výrobky z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově, které působí výztužně ve dvou směrech. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken, které se nazývají vazby. [5]

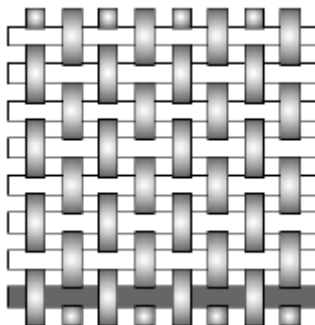
Tato práce se věnuje kompozitům s tkaninovou výztuží.

2.1.4 Vazby tkanin pro kompozity

Rovingové tkaniny mají různou textilní vazbu. Vedle požadavků na tuhost a pevnost kompozitu o vhodné vazbě rozhoduje i tvarová členitost forem. Vzájemné uspořádání osnovy a útku vytváří tři základní typy vazeb:

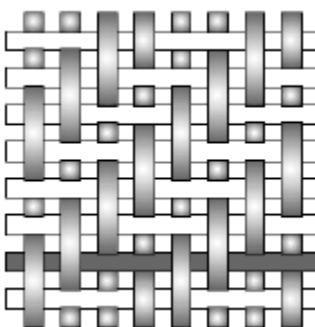
- **plátňová vazba** (angl. “plain”) je nejpevnější a také nejméně poddajná při tvarování, když prameny (nebo rovingy) v osnově i útku jsou stejně silné a stejnoměrně vzdálené. Pramenec útku prochází vždy pod a nad každým

pramenem osnovy (tzv. vyvážená plátnová vazba viz obrázek 2.8). Volnější a tím i poddajnější plátnovou vazbu vytvářejí dva a více pramenů útku procházejícího pod dvěma nebo více nitěmi osnovy (košíková vazba, angl. „basket“).



Obr. 2.8 Plátnová vazba [4]

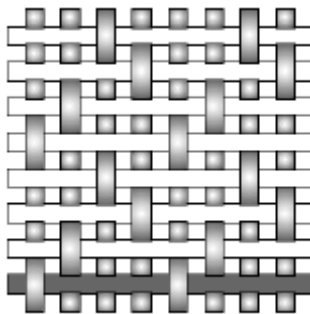
- **keprová vazba** (angl. “twill”) je vytvořena, když útek překříží minimálně dvěma prameny osnovy, než opět projde pod jedním nebo více prameny osnovy. V další řadě se útek posouvá doprava nebo doleva vždy k nejbližšímu prameni osnovy. Na tkanině je tak vytvářen diagonální vzor viz obrázek 2.9. Pokud je použita vazba např. 3/1, znamená to, že jeden pramen osnovy je překryt třemi prameny útku a jedním pramenem na spodní straně (vzniká lomený vzor). Tkanina s keprovou vazbou je ohebnější, ovšem pouze při měkké povrchové úpravě vláken.



Obr. 2.9 Keprová vazba [4]

- **atlasová vazba** (angl. “satin”) viz obrázek 2.10 je nejméně pevnou textilní vazbou. Jeden pramen osnovy je překryt čtyřmi a více prameny útku svrchu a jedním pramenem ze spodní strany. Počet pramenů osnovy překrytých útkem udává tzv. vaznost atlasu (5 až 12). Povrch tkaniny je hladký a lesklý, s dlouhými ploškami, v nichž vlákna leží rovnoběžně s povrchem. Vazba

umožňuje dosáhnout vysoký objemový podíl vláken ve vrstvě kompozitu a zaručuje minimální zvlnění vláken. S atlasovou tkaninou je tedy možno získat kompozit s větší pevností a tuhostí než při použití běžných tkanin. Atlasová tkanina, je-li použito měkké povrchové úpravy vláken, je dobře tvarovatelná (splývavá). [1]



Obr. 2.10 Atlasová vazba [4]

2.1.5 Anorganická vlákna pro kompozity

Materiály ve formě vláken se cíleně jako konstrukční prvky používají zřídka. Zajímavou skupinou materiálů se stávají teprve v kompaktní formě, jako je tomu v kompozitních materiálech. [6]

2.1.5.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna mají silikátový základ (SiO_2). Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů Si (s příměsí oxidů Al, Ca, Mg, Pb a B) a většinou s malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K. Potřebného průměru vláken se dosáhne dloužením proudu skla tekoucího tryskami (průměr trysky 1 mm) ve dnu zvlákňovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování vlákna. Jednotlivá vlákna se po povrchové úpravě (sizing) sdružují do pramene a navíjejí se na cívku. Sdružením pramenů vzniká roving (kabílek). [1, 5]

Technologie výroby skla

Při výrobě skla se uplatňují čtyři dílčí technologické procesy:

- **Příprava vsázky** (tj. sklářského kmene a přísad) **a její dávkování**

Pomleté a vysušené suroviny se mísí a homogenizují v požadovaném poměru v mísicích zařízeních. Míšení je prováděno nejčastěji strojně pomocí uzavřených mísidel, aby byla minimalizována prašnost surovin.

- **Tavení skla**

Provádí se ve sklářských tavicích pecích. Ty bývají nejčastěji pánvové nebo vanové. Tavicí proces se dělí na tři hlavní fáze: *vlastní tavení*, *čeření* a *homogenizace a chlazení* (sejití skloviny) pro tvarování. Při tavicím procesu se dosahuje nejčastěji teplot v rozmezí 1400 – 1600 °C. Jako palivo je nejčastěji používán generátorový nebo zemní plyn.

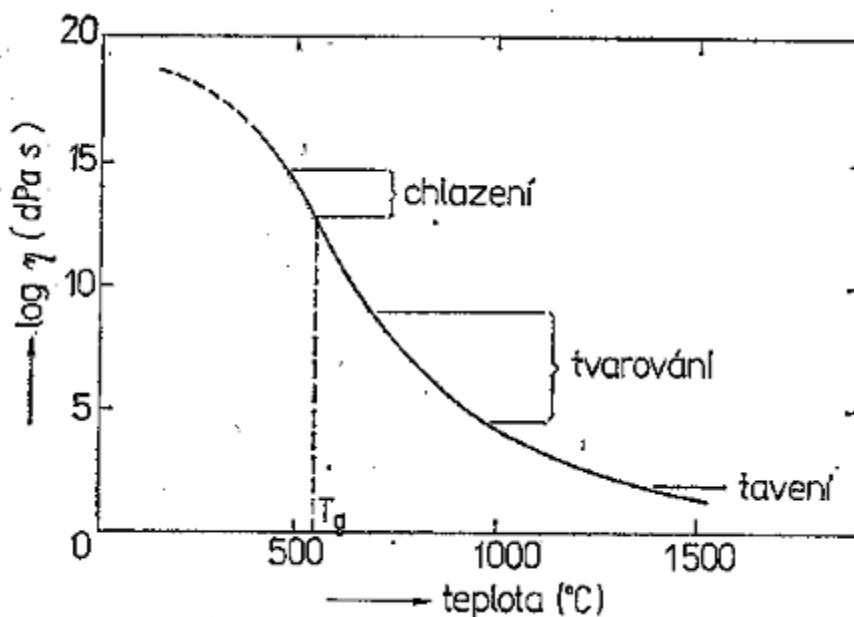
- **Tvarování skla**

Při tvarování se využívá viskózní deformace a silné závislosti viskozity skloviny na teplotě. Během tvarování nesmí dojít ke krystalizaci skloviny. Tvarování se provádí od ručních až po plně automatizované procesy, a to *foukáním*, *tažením*, *válcováním*, *litím* nebo *lisováním*.

- **Chlazení skla**

Provádí se ve speciálních chladicích pecích, zpravidla v teplotním intervalu 700 – 400 °C. Jedná se o proces *řízeného chlazení*, kdy se z výrobku úplně odstraní vnitřní pnutí, případně se zabrání jeho vzniku. K vnitřnímu pnutí dochází při nerovnoměrném chlazení skloviny, kdy oblast skla s nižší teplotou má odlišné chování než oblast s vyšší teplotou. Chlazením lze i podstatně zvýšit pevnost skla. Po ochlazení se může sklo povrchově upravovat – brousit, leštit, pískovat nebo leptat. [7]

Vliv jednotlivých procesů při výrobě skla na viskozitu skla, viz obrázek 2.11.



Obr. 2.11 Vliv jednotlivých procesů při výrobě skla na viskozitu skla [8]

Při výrobě textilních vláken se v průběhu tažení nanáší na čerstvě tažená vlákna šlichta (lubrikace) ve formě vodní emulze. Úkolem šlichty je

- spojit jednotlivá vlákna do manipulovatelného spřádacího vlákna;
- chránit citlivý povrch křehkých elementárních vláken;
- přizpůsobit stávající vlákna dalšímu zpracovatelskému procesu;

zlepšit vazby mezi organickou pryskyřicí a anorganickým vláknem.

Lubrikace obsahují mj. čtyři základní důležité složky:

- filmotvornou – vinylacetáty polymerizované do určitého stupně, polyester a jiné pryskyřice, chránit elementární vlákna a spojující je do pramenů,
- maziva – poskytují vláknu, příp. příslušnému produktu, potřebné kluzné vlastnosti,
- apretace – obvykle na silanové bázi – typ apretace musí odpovídat použitému typu pryskyřice (matrice),
- antistatika – anorganické soli, které odvádějí elektrostatický náboj.

Protože sklovina je směrem od povrchu ochlazována a tuhne, vznikají při tažení v této oblasti pnutí. Přiměřeně tomu je vnější obal vlákna roztahován, zatímco vnitřní hmota, která je dříve v roztaveném tekutém stavu, nevykazuje žádná napětí. Po ochlazení celého průřezu a ukončeném tažení je vlákno z vnější strany pod vlastním radiálním a osovým tahovým napětím, proti kterému působí uvnitř vlákna vlastní tlakové napětí. [5]

V kompozitech jsou používána vlákna ze skloviny C (kyselinám odolná vlákna), D (vlákna dielektrická), E, ECR (Advantex[®]), AR (vlákna odolná alkáliím) S, S-2 (vysoce pevná vlákna), S-3 UHMT (vlákna s vysokým modulem pružnosti), L vlákna (se zvýšeným obsahem olova), L GlassTM s malou relativní permitivitou a malým ztrátovým činitelem při vysokých frekvencích a křemenná vlákna které je nutno aplikovat na jednotlivá (elementární) vlákna, tj. ještě před jejich spojením do pramenu. [1]

Vlákna ze skloviny C s vyšším podílem alkálií mají nižší teplotu měknutí, jsou méně pevná a jejich mechanické vlastnosti rychleji klesají s rostoucí teplotou. V prostředí obsahujícím kyseliny větší podíl alkalických prvků zlepšuje odolnost proti rozpouštění, v samotné vodě se však alkalické prvky rychle vyluhují. [1,5]

D sklo je určeno pro elektrická zařízení. Jedná se o vlákna dielektrická, s malými hodnotami relativní permitivity a malým ztrátovým činitelem.

Skleněná vlákna z E skloviny (tzv. bezalkalické vápenato-hlinito-boro-křemičité sklo, sklo Eutal má eutektické složení s nejmenší teplotou tavení, je nejlevnější (od 1,6 do 3,15 \$/kg) a přitom má dobré mechanické a elektrické vlastnosti (nevodivost, velký povrchový odpor, relativně malou relativní permitivitu (dříve dielektrická konstanta) při malých dielektrických ztrátách (relativní permitivita se pohybuje mezi 5,9 až 6,4 a ztrátový činitel (tangens ztrátového úhlu) při frekvenci 1 MHz je 0,0039) a poměrně dobrou odolnost proti hydrolýze (rozkladu v horké vodě).

Vlákna ze skloviny ECR, korozivzdorné sklo bez oxidu boru, obchodní značky Advantex[®], vyráběné společností Owens Corning. Řídí se vícesložkovým fázovým diagramem ($\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--MgO}$). Má větší hustotu, větší modul pružnosti, větší teplotu zvláknování, větší teplotu měknutí, větší odolnost v kyselém prostředí a horší elektrickou permitivitu než běžné E sklo. [1]

Vlákna ze skloviny AR jsou vhodná pro alkalické prostředí. Sklovina je odolná vůči tomuto prostředí (používají se například pro výrobu střešních šablon s cementovým pojivem, tzv. „ekologický“ eternit). Pokud není k dispozici, vyhovuje i E sklo. [1,5]

Vlákna ze skloviny S mají větší podíl oxidu křemíku a hliníku a jsou dražší (jejich cena se pohybuje od 19 do 31,6 \$/kg), protože sklovina má větší teplotu tavení. Používají se většinou v kompozitech s epoxidovou matricí. Vlákna mají větší pevnost v tahu a větší modul pružnosti v tahu než standardní vlákna z E skla. Na základě skla S je možno získat nové biomateriály. HPBTM jsou aktivovaná vlákna, vhodná pro dočasné implantáty. Jsou kompatibilní s řadou termoplastů, jako jsou polyaryl etheretherketony (PAEK), polyetherimid (PEI) a polyfenylensulfid (PPS). [1]

Vlákna ze skloviny R mají také velkou pevnost, Ochlazování skloviny se řídí vícesložkovým fázovým diagramem SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO. R sklo například vyrábí Vetrotex Saint-Gobain. [1,5]

Vlákna ze skloviny S-2 mají větší pevnost než vlákna S. Pod obchodním názvem ZenTron[®] a VeTron[®] je vyrábí společnost AGY. (Společnost AGY také vyrábí ultra-jemná skleněná vlákna BC2250 a BC3000 pro tištěné elektrické obvody, které potom mohou mít větší hustotu spojů).

Vlákna ze skloviny S-3 UHM s velkým modulem pružnosti v tahu (nový výrobek společnosti AGY).

Vlákna ze skloviny L obsahují oxid olova. Olovo především zvyšuje nepropustnost vyrobeného laminátu pro rentgenové záření. Aplikace tohoto typu skla najdeme v lékařství a vědeckých přístrojích.

NDT sklo – nové sklo společnosti Corning se jmenuje Gorilla[®]Glass 3 NDTTM. Je odolné proti poškrábání, takže se hodí pro dotykové obrazovky (mobilní telefony, tablety, notebooky, ultrabooky) a na čelní automobilová okna (NDR, “Native Damage Resistance”). Sklo je připraveno chemickou temperací, jeho odolnost vyplývá z existence tlakového pnutí na povrchu. Vlákna se z něho nevyrábějí.

Dutá skleněná vlákna z H-skla mají menší hustotu než plná vlákna E a S-2 a mají proto velkou měrnou pevnost (N/tex). Jsou elastická a pevná v tlaku, mají dobrou elektrickou, tepelnou a akustickou izolační schopnost a v některých kompozitech se

uplatní i jejich dobrá schopnost tlumit energetické rázy (kryty radarů a antény letadel). Jsou použita i v laminátu lyží Head, jejichž výrobce uvádí, že jde o nejlehčí lyže na trhu právě díky použití dutých skleněných vláken (název dutých vláken je “ Aircoat”).

L-Glass™ je nové sklo pro vysokofrekvenční tištěné elektrické obvody a pro radomy letadel (toto sklo má malou relativní permitivitu a malý ztrátový činitel oproti E sklu). Vyrábí jej společnost AGY. Složení skloviny nebylo možno stanovit.

Křemenná vlákna mají stejně nízkou relativní permitivitu jako polymerní aramidová vlákna, ale oproti nim mají o dva řády menší ztrátový činitel při vysokých frekvencích proudu, velmi malý součinitel délkové teplotní roztažnosti (vydrží teplotní šoky), má nulovou adsorpci vlhkosti a dobrou prostupnost pro UV paprsky světelného záření. Křemenné sklo měkne již při 1300°C, ale při větších teplotách se nestává kapalným. Společnost JPS Composite Materials Corp. vyrábí Astroquartz®, Astroquartz® II, Astroquartz® III, společnost Sain-Gobain dodává Quartzel.

Výroba křemenných vláken spočívá v rozemletí čistého krystalického křemene a jeho roztavení (teplota tání 1600 - 1725 °C). Vlákn S-Q tvoří přechod mezi křemennými a ostatními skleněnými vlákny. Obsahují 95 a více % SiO₂ Q-Fiber™ je křemenná vata pro tepelné izolace a filtraci.

O mikrostruktuře skleněných vláken je velmi málo poznatků vzhledem k jejich amorfnímu stavu, který je způsoben nepatrnou krystalizační rychlostí směsi oxidů při ochlazování taveniny. Předpokládá se, že na vysoké pevnosti skleněných vláken, vedle tzv. velikostního faktoru (malý povrch a malé defekty v tenkém vlákně), se podílí také odlišná struktura jádra a povrchových vrstev. Zatímco jádro obsahuje nahodile orientovanou síť kovalentně vázaných atomů, povrch má pravděpodobně semi-orientovanou strukturu. Na povrchu tak vzniká vysoké tlakové napětí v podélném směru, které zabraňuje snadnému rozvoji trhlin při tahovém zatížení vlákna. Podobný mechanismus je v souladu se skutečností, že jakékoliv narušení povrchových vrstev (např. mechanické poškrábání) vede k drastickému poklesu tahové pevnosti vlákna. Předpokládaná tenká povrchová vrstva s preferovanou orientací kovalentních vazeb se však neprojevuje měřitelnou anizotropií elastických veličin skleněného vlákna. Při mikromechanických výpočtech se uvažují stejně veliké hodnoty modulu pružnosti E a Poissonova poměru ν ve směru podélném i příčném.[1]

Vlastnosti skleněných vláken - shrnutí

Skleněné vlákno je izotropní, což znamená, že jeho materiálové vlastnosti v podélném a příčném směru jsou totožné.

pevnost v tahu $\sigma_{P\parallel f} = \sigma_{P\perp f} = 3\,500 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ pro čerstvě tažené vlákno,

$$\sigma_{P\parallel f} = \sigma_{P\perp f} = 1\,500 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \text{ po zpracování;}$$

E – modul $E_{\parallel f} = E_{\perp f} \sim 75\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$;

součinitel teplotní délkové roztažnosti

$$\alpha_{\parallel f} = \alpha_{\perp f} \sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1};$$

pro porovnání typické hodnoty jiných materiálů:

$$\text{ocel} \sim 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1},$$

$$\text{měď} \sim 7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1},$$

$$\text{hliník} \sim 21 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1},$$

$$\text{plasty} \sim 80 \text{ až } 200 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1};$$

elektrická vodivost $\sim 10^{-13} [\text{S} \cdot \text{m}^{-1}]$.

- **Modul pružnosti v tahu** (E – modul) skleněných vláken je přibližně stejně velký jako hliníku a činí asi jednu třetinu hodnoty oceli, pevnost v tahu je vyšší než u většiny organických i anorganických vláken a je většinou podstatně vyšší než u oceli (v kompaktní formě). Vzhledem k porovnatelně nižší hustotě skla je hodnota měrné pevnosti vláken zvláště vysoká.
- **Mez průtažnosti** skleněného vlákna má hodnotu kolem 3 %. Deformace je přitom téměř elastická, tj. skleněné vlákno nemá viskoelastické chování jako syntetická vlákna.
- **Tepelné vlastnosti** skleněných vláken překonávají tepelné vlastnosti jiných materiálů. Ani dlouhodobé trvalé tepelné namáhání při 250 °C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. Tepelná vodivost je naproti tomu vyšší než u ostatních materiálů, ale podstatně nižší než u kovů.
- Skleněná vlákna jsou **nehořlavá**, a tudíž ohnivzdorná. Hodí se proto pro kompozity a závěsy.
- **Bod měknutí** E-skloviny je vyšší než 625 °C.
- **Součinitel teplotní délkové roztažnosti** skleněných vláken je nižší než u většiny konstrukčních materiálů.

Při široké nabídce výztuží ze skleněných vláken jsou konečné vlastnosti kompozitů ve značné míře závislé na druhu, obsahu a orientaci skleněných vláken, příp. výrobků z nich. [5]

2.1.5.2 Uhlíková vlákna

Mají nejširší spektrum mechanických vlastností při poměrně malé hustotě (1,8 – 2 g/cm³). Uhlík ve styku s méně ušlechtilými kovy vytváří galvanický článek – dochází k elektrochemické korozi, při níž koroduje kov. Kompozit s uhlíkovými vlákny musí být proto od kovu oddělen nevodivým materiálem.

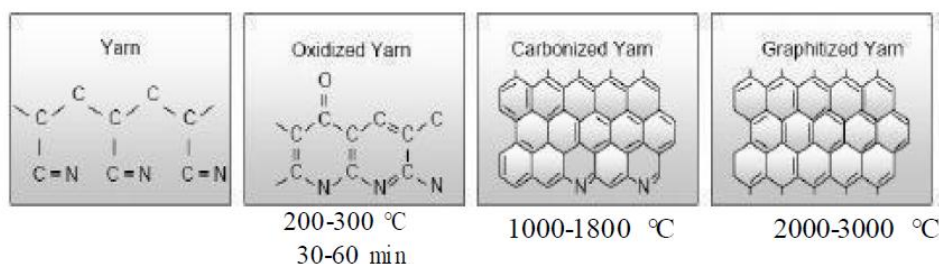
Uhlíková vlákna se dnes vyrábějí převážně z vláken polyakrylonitrilových (PAN) a nejnověji z vláken novoloidu – vláken fenol-aldehydových.

Ve směru osy vlákna jsou protáhlé (acikulární) mikrokrystaly turbostratického uhlíku v případě vláken vyrobených z PAN tvořeny vždy několika paralelními aromatickými rovinami. V příčném řezu vlákna pásy nedosahují větších rozměrů a jsou různě stočeny. V podélném směru vlákna jsou mikrokrystaly vzájemně natočeny pod malými úhly (lze také říci, že pás rovnoběžných aromatických rovin je zvlněný). Mikrokrystaly lze v pásích detekovat RTG metodou, mají charakteristickou délku 10 až 50 nm. Z tloušťky pásů (transmisní elektronový mikroskop) lze odvodit, že je tvoří 10 až 30 paralelních aromatických rovin. Vláknem obsahuje též mikroskopické póry protažené ve směru podélné osy vlákna. Vedle těchto mikroskopických pórů vlákno obsahuje i submikroskopické dutiny mezi jednotlivými mikrokrystaly. Submikroskopické dutiny mají v příčném řezu rozměr okolo 3 nm. Důsledkem malého odklonu aromatických rovin mikrokryсталů od podélné osy vlákna je, že vlákna z PAN nedosahují větších modulů pružnosti, přesto však mají modul pružnosti E větší než ocel. Vysokou pevnost tzv. středně modulových vláken (IM vlákna o pevnosti až 7000 MPa) zaručují jemné mikrokrystaly a minimální množství defektů mezi nimi.

Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN je možno rozdělit do tří etap:

- **Stabilizace** - při teplotách 200 až 300 °C, za působení tahového napětí a v oxidačním prostředí je PAN vlákno stabilizováno. Dojde k cyklizaci vazeb v řetězci makromolekuly PAN (vytvoření paralelních žebříkovitých makromolekul) a k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými můstky. Vlákno při této etapě zčerná a stane se netavitelným.
- **Karbonizace** - při teplotách od 1000 do 1800 °C v inertním prostředí (velice čistý dusík) ve vláknu proběhne karbonizace (odstraní se vodík a sníží obsah dusíku a kyslíku, 80 až 95 % hmoty tvoří uhlík). Vlákno dosáhne maximální pevnosti v tahu.
- **Grafitizace** - při teplotách do 3000 °C v inertním prostředí (argon). Ještě více se zvětší obsah uhlíku a umožní se vznik dokonalejších mikrokrytalů. Vyvinutější mikrokrystaly vedou k zvětšení tuhosti vlákna. U vláken z PAN je přírůstek tuhosti dosažen za cenu poklesu pevnosti, protože zvětšení velikosti mikrokrytalů vede též k zvětšování defektů mezi nimi.

Změny struktury PAN vlákna jsou zobrazeny na následujícím obrázku 2.12.



Obr. 2.12 Změny struktury PAN vlákna [1]

Pro výrobu nejtužších uhlíkových vláken se používá dehtů (zbytků po destilaci ropy nebo černého uhlí). Vysoce tuhá a přitom pevná vlákna poskytuje pouze tzv. mezofázový dehet (v mezofázových dehtech jsou aromatické roviny různé molekulové hmotnosti paralelně uspořádány, tj. i v tekutém dehtu jsou krystaly (dehet s kapalnými krystaly, angl. “MesoPhase Pitch”, MPP)).

Úprava povrchu uhlíkových vláken

Vyrobená uhlíková vlákna jsou podobně jako vlákna skleněná dodatečně upravena. Účelem je:

- Odstranit z povrchu vláken látky bránící kontaktu s matricí.
- omezit další adsorpci plynů na povrch vláken
- zvýšit reaktivitu povrchu vůči vazebným prostředkům a matricím
- chránit vlákna před vzájemnou abrazí (uhlíková vlákna jsou křehčí než skleněná)

Jestliže reaktivita ploch aromatických rovin je malá, jejich hrany a rohy jsou vysoce reaktivní a vážou kyslík, oxidy uhlíku, karboxylové kyseliny, karbonylové, hydroxylové a případně aminové a kyanové skupiny. Vlhkost a plynné látky mohou způsobit potíže při výrobě kompozitů, protože zůstávají pouze fyzikálně vázány. Během vytvrzování matrice za vyšších teplot se vlhkost odpařuje za vzniku mikroskopických plynových bublinek obalujících vlákna. Zabránit se tomu dá buď:

- odplyněním povrchů vláken vakuovou desorpcí
- rozpuštěním adsorbovaných látek v pryskyřici při vhodném režimu vytvrzování
- úpravou povrchu vláken

Nejčastěji se vyrobená vlákna chrání polymerními povlaky na bázi epoxidů nebo polyimidů, jejichž účelem je zabránit adsorpci látek a zároveň poskytnout vláknům ochranu před abrazí. [1]

2.1.5.3 Čedičová vlákna

Čedičová vlákna patří do skupiny horninových vláken. Výroba těchto vláken se více rozšířila teprve v době nedávné, jedná se v podstatě o nový typ technického vlákna. Vlastnosti čedičových vláken jsou velice podobné vlastnostem skleněných vláken typu S. Pro své vlastnosti jsou čedičová vlákna vhodná k výrobě produktů, na které jsou kladeny zvýšené užité vlastnosti, tepelně – izolační vlastnosti, a také zvýšená

chemická odolnost. Další výhodou je cena čedičových vláken, která je nižší než cena skleněných vláken. [9]

Čedičová vlákna mají téměř kruhový průřez a jsou téměř hladká. V dnešních dobách se čedičová vlákna vyskytují ve formě kontinuálních a staplových vláken. [10]

Výroba čedičových vláken

Technologie používaná na výrobu čedičových vláken je obdobná jako technologie na výrobu vláken skleněných.

Základní požadavky na surovinu pro výrobu vláken:

- 1) Surovina musí být homogenní, stejnorodá. Čedič nesmí obsahovat tělesa jiného složení. Velmi škodlivé jsou také např. Úlomky podložních hornin, jako jsou zrna křemene atd.
- 2) Surovina nesmí být hrubozrnná. Všeobecně totiž platí, že se stoupající velikostí krystalů se prodlužuje doba tavení a také se zhoršuje homogenizace.
- 3) Pro výrobu vláken by měl být používán čedič, který je nezvětralý. Zvětráním dochází k nežádoucím změnám v chemickém i nerostném složení.

Čedičová vlákna jsou vyráběna ve formě kontinuálních vláken nebo ve formě staplových vláken o délce 1 – 500 mm.

Technologie výroby kontinuálních čedičových vláken

Čedičová vlákna se vyrábějí jednostupňovým tažením vlákna, které probíhá při teplotách 1 500 – 1 700 °C. Dále se na vlákna nanáší lubrikace. Lubrikace snižuje mechanické poškození vláken při tření vláken o sebe. Při mechanickém poškození se výrazně snižuje pevnost vyráběných vláken. Po nanesení lubrikace probíhá navíjení vyrobených vláken. Pro výrobu čedičových vláken se nejlépe osvědčily středně kyselé čedičové vyvřeliny. [11]

Vlastnosti čedičových vláken

Barva čedičových vláken je hnědá, hnědošedá, hnědozelená, zelená. Barva závisí na obsahu jednotlivých oxidů v surovině. Tato vlákna jsou nehořlavá, mají minimální nasákavost. Výhodou je jejich velký tepelný rozsah použitelnosti. Tento rozsah se pohybuje v rozmezí cca od -200 °C do 800 °C. Čedičová vlákna se vyznačují svoji chemickou odolností ve vodě a v alkáliích. Tato vlákna mají nízkou tepelnou vodivost, vysoký koeficient zvukové pohltivosti a vysoký elektrický odpor. Dále tato vlákna mají dobrou tepelnou odolnost, odolnost proti UV záření a jsou odolná proti plísním a jiným mikroorganismům. Tato vlákna se vyrábějí s minimálním průměrem 9 μm. [10]

Čedičová vlákna úspěšně nahrazují vlákna skleněná. Fyzikální, tepelné a chemické vlastnosti čedičových vláken jsou srovnatelné s vlastnostmi skleněných vláken. Porovnání těchto vlastností je znázorněno v tabulkách 2.1, 2.2 a 2.3. Pouze skleněné vlákno typu AR odolává stejně jako vlákna čedičová alkalickému prostředí. Oproti čedičovým vláknům je jeho cena několikanásobně vyšší. Další výhodou je nehořlavost čedičových vláken. [12]

Tab. 2.1 Hodnoty fyzikálních vlastností čedičových a skleněných vláken [12]

Fyzikální vlastnost a její jednotka	Čedičová vlákna	Skleněná vlákna
Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	2 900	2 600
Navlhavost [%]	0,5	1
Modul pružnosti v tahu [GPa]	100	70
Pevnost v tahu [GPa]	1,85-2,15	1,85-2,15
Pevnost v tlaku [GPa]	0,3	0,3
Změna pevnosti v tahu [%]		
při relativní vlhkosti 100 % za 64 dny	91	72
při teplotě 400 °C	82	52

Tab. 2.2 Hodnoty chemických vlastností čedičových a skleněných vláken [12]

Chemická vlastnost a její jednotka	Čedičová vlákna	Skleněná vlákna
Úbytek hmotnosti při 100 °C za 3 hod. v H ₂ O [%]	99,8	99,3
Úbytek hmotnosti při 100 °C za 3 hod. v 2N HCl [%]	81,8	52

Tab. 2.3 Hodnoty tepelných vlastností čedičových a skleněných vláken [12]

Tepelná vlastnost a její jednotka	Čedičová vlákna	Skleněná vlákna
Pracovní teplota [°C]	-200 až +700	-60 až +460
Měrná tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,027 až 0,033	0,029 až 0,035

2.2 Struktura kompozitu

2.2.1 Strukturní úrovně v kompozitu

Z hlediska struktury je velmi důležité dodržovat posloupnost kompozit – textilní vrstva – vlákenný svazek – vlákno, viz tabulka 2.4. Toto je důležité pro odvození výsledných vlastností a to hlavně při zkoumání vlivu mikroskopické odezvy jednotlivých prvků na makroskopickou odezvu celého kompozitu.[9,10]

V této práci byly studovány strukturní prvky na makro úrovni.

Tab. 2.4 Posloupnost strukturních úrovní [13]

Úroveň	Objekt	Rozměr
Makro úroveň	Kompozit	Jednotky až desítky mm
Mezo úroveň	Textilní vrstva	Jednotky až desítky mm
Mikro úroveň	Vlákenný svazek	Jednotky mm
Mikro úroveň	Vlákno	Tisíciny až desetiny mm

Ideální struktura

Ideální struktura opomíjí základní zákonitosti reálné struktury a nebere v úvahu mnoho vlivů. Ve většině případů se jedná o teoretický model a její popis nemusí být tedy založen na případech z praxe. Její největší výhodou je jednoduchost a díky vyloučení nedílné složky i její přesná periodicitu. Používá se jako základ při vytváření jednoduchých modelů – např. při odhadování vlastností zkoumaného materiálu.

Reálná struktura

Reálná struktura je získána experimentálním pozorováním – většinou v podobě obrázků nasnímaných řezů. Tím pádem obsahuje nahodilou složku a to brání její periodicitě. Nevýhodou je, že se u každého nasnímaného řezu liší a navíc neobsahuje všechny potřebné informace – např. prostorovou strukturu. I přes tuto nevýhodu je ale v popisu reálná struktura na vyšší úrovni, než ideální a podává přesnější informace o zkoumané struktuře vzorku. [14]

2.2.2 Strukturní defekty

Při výrobě kompozitů dochází vlivem fyzikálních, mechanických i chemických sil ke vzniku defektů a imperfekcím struktury. Procesy, při kterých strukturní defekty vznikají, jsou popsány níže.

Laminace – nevhodná impregnace, nečistoty na povrchu vláken, nízká povrchová energie vláken, geometrické uspořádání vláken, pryskyřice při prosycování proniká rychleji většími póry, nejtěsnější póry ve vlákenných svazcích mohou zůstat neprosyceny.

Vytvrzování – při nedostatečném vytvrzování se v dalším procesu uvolňují ve větším množství těkavé zplodiny rozpouštědla, které rozevírají póry. Do prostoru mezi vlákny, kam nezatekla pryskyřice, pronikají těkavé zplodiny rozpouštědla, které když dosáhnou bodu varu, mnohonásobně zvětší svůj objem.

Pyrolýza – změny objemu při pyrolýze matrice. Nestejnoměrné rozložení matrice má za důsledek různé objemy rozkládaných produktů.

Po pyrolýze – rozdíly v dilataci vláken a matrice. Anizotropie dilatace vláken. [14]

2.2.3 Klasifikace defektů ve struktuře kompozitu

Strukturní defekty můžeme klasifikovat podle různých hledisek, např. podle:

- Mechanismu vzniku;
- Místa vzniku;
- Vlivu na mechanické vlastnosti;
- Orientace;
- Velikosti [15]

Třídění podle místa výskytu a vlivu na mechanické vlastnosti se do jisté míry prolíná.

Typy strukturních defektů dle způsobu vzniku

Nežádoucím důsledkem fyzikálně-chemických procesů probíhajícím při přípravě kompozitů je výskyt strukturních defektů – pórů a trhlin, a to jak uvnitř vláknenného svazku, tak i v matrici, velní složitá je rovněž oblast rozhraní.

Hlavní typy makroporézních defektů tvoří trhliny vzniklé srážením matrice, trhliny vzniklé tepelně-tlakovým působením a bublinkové póry. Tyto defekty jsou nevyhnutelnými důsledky tepelného zpracování při výrobě kompozitů. [16]

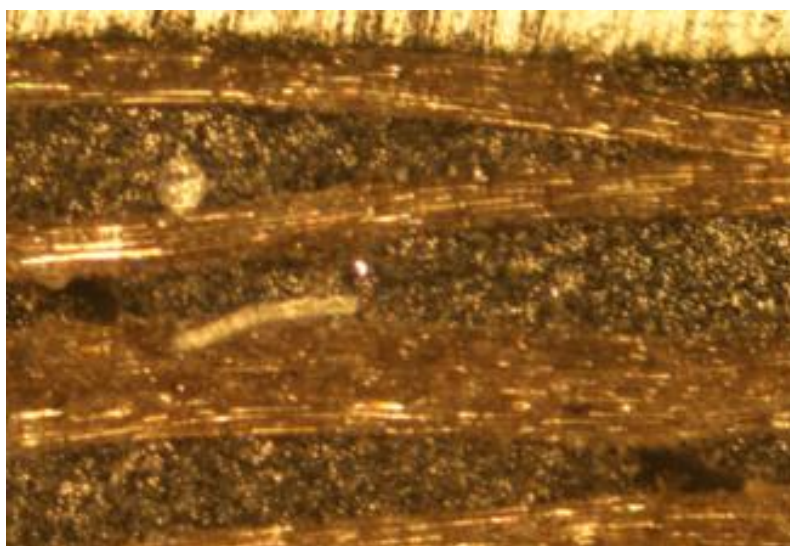
Bublinové póry

Zásadním hlediskem pro kvalitní kompozit je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice vlákno. Pro dosažení lepší fyzikální a příp. i chemické vazby mezi vláknem a matricí se nanese na vlákno apretace vhodná pro určitý druh matrice. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin. [5]

Na následujících obrázcích 2.13 a 2.14 jsou nasnímány bublinové póry kompozit.



Obr. 2.13 Bublinový pór v kompozitu, měřítko 200 μm [vlastní zdroj]



Obr. 2.14 Bublinový pór v kompozitu [vlastní zdroj]

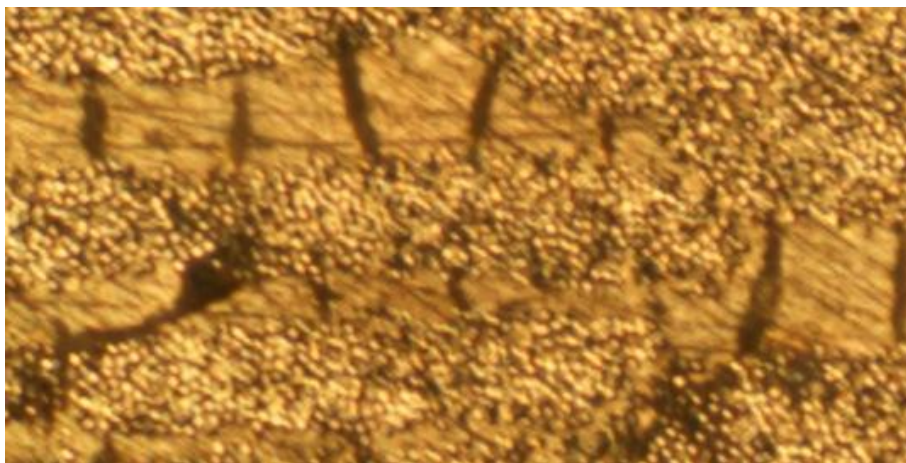
Trhliny

Rozměrové změny, ke kterým dochází u výztuže i matrice během výroby kompozitu, mohou mít za příčinu vznik trhlin. Při zahřívání kompozitu během výroby, probíhají v jeho struktuře tepelně-rozměrové změny. Trhliny jsou destičkové dutiny, jejichž tloušťka je oproti zbývajícím dvěma rozměrům zanedbatelná a může dosáhnout

poloviny tloušťky textilní vrstvy. V příčném řezu kompozitní strukturou se jeví jako délkový útvar, mající řádově šířku desítek průměrů vlákna. Jejich výskyt je důsledkem objemových změn při vytvrzování matrice a při chladnutí kompozitu.

V průběhu zahřívání ztrácí matrice původní hodnoty objemu. Pokud je srážení omezováno okolní vlákennou výztuží dochází k iniciaci trhlin v nově vznikající matrici a jejím okolí.

Trhliny mohou být tvořeny také působením tlaku a tepla vzniklým anizotropií tepelné expanze a rozdíly mezi tepelnou expanzí uvnitř vlákenného svazku a tepelnou expanzí v matrici. [14,17]



Obr. 2.15 Trhliny v kompozitu [vlastní zdroj]

2.3 Počítačová analýza obrazu

Analýza obrazu se sestává z důležitých prvků:

Snímání a převedení do číslíkové formy je v podstatě obrazovou analýzou v užším slova smyslu a jsou pro ni typické *transformace* obrazu, identifikace objektů – *segmentace* a kvantifikace do omezeného množství čísel – *měření*. [14,18]

Snímání obrazu

Je-li barevný obraz snímán černo-bílou kamerou, je nutné brát v úvahu spektrální charakteristiku kamery a barvu polarizačního světla. Při použití dobrých světelných filtrů a barevných preparátů pak snímání černobílou kamerou zcela vyhovuje. [14,19]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část obsahuje metodiku tvorby příčných řezů a tvorby nábrusů. Vytvořenou metodiku a problematiku snímání pomocí světelné mikroskopie. Výsledné obrazy byly popsány a následně statisticky zpracovány v programu NIS-elements, kde byly naměřeny parametry vzniklých strukturních defektů, a byl zjištěn podíl pórů. Výsledky měření byly statisticky vyhodnoceny a graficky znázorněny. Dále s využitím statistických metod se z naměřených dat zjišťoval vliv teploty, tlaku, vazby a počtu vrstev na výsledný plošný podíl pórů v kompozitu.

3.1 Použité přístroje

V průběhu vypracování diplomové práce byly použity tyto přístroje:

- Uhlová bruska BOSH
- Bruska MTH – k vytvoření příčných řezů
- Automatický stolek
- Barevná kamera NIKON DS
- Mikroskop NIKON Eclipse ME 600 DS
- Feico, Vega – rastrovací elektronový mikroskop
- Konfokální mikroskop OLYMPUS LEXT OLS3000
- Počítač Intel Pentium (R) 4 CPU, 5,6 GHz, 512 MB RAM

Softwarové vybavení:

- Systém Windows XP SP2
- Systém obrazové analýzy NIS elements

Měření bylo provedeno na Katedře materiálového inženýrství.

3.2 Popis vzorků

Pro tento experiment bylo použito 12 vzorků kompozit. Jako výztuž pro všechny druhy byla zvolena tkanina zhotovená ze skleněných vláken. Vzorky se od sebe lišily použitou vazbou tkaniny (plátno, kepr, atlas), počtem vrstev výztuže (6 nebo 8), teplotou vytvrzení (200°C, 600°C, 1100°C) a tlakem při lisování (1,4 MPa, 3 MPa, 5,9 MPa) viz tabulka 3.1.

Tab. 3.1 Vzorky použitých kompozitů

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží				
Číslo vzorku	Struktura	Složení (počet vrstev výztuže)	Teplota vytvrzení [°C]	Tlak při lisování [MPa]
1	Atlas 3/1	6	250	1,4
2	Atlas 3/1	6	250	3
3	Atlas 3/1	6	250	5,9
4	Kepr 2/2	6	250	1,4
5	Kepr 2/2	6	250	3
6	Kepr 2/2	6	250	5,9
7	Plátno	6	200	$1,4 \cdot 10^{-2}$
8	Plátno	8	200	$1,4 \cdot 10^{-2}$
9	Plátno	6	600	$1,4 \cdot 10^{-2}$
10	Plátno	8	600	$1,4 \cdot 10^{-2}$
11	Plátno	6	1100	$1,4 \cdot 10^{-2}$
12	Plátno	8	1100	$1,4 \cdot 10^{-2}$

Z každého vzorku byl vytvořen jak příčný, tak podélný řez. Celkem tedy bylo 24 vzorků. Proto dále bude značení například: **1o** tzn. 1 osnova a **1ú** tzn. 1 útek.

Jako matrice byl zvolen metylsilikonový lak LUKOSIL M 130. Tento lak představuje typ pokojové teploty zasychajícího silikonového laku a je špičkovým výrobkem ve své kategorii. Je to roztok silikonové pryskyřice v syľenu jako rozpoušľedle. Při pokojové teplotě vytváří **Lukosil M 130** nelepivý, pružný a mechanicky poměrně odolný film. Tepelným vytvrzením se dosáhne zvýšení jeho tvrdosti, mechanické a chemické odolnosti a stabilizuje se pro trvalé tepelné namáhání. [20]

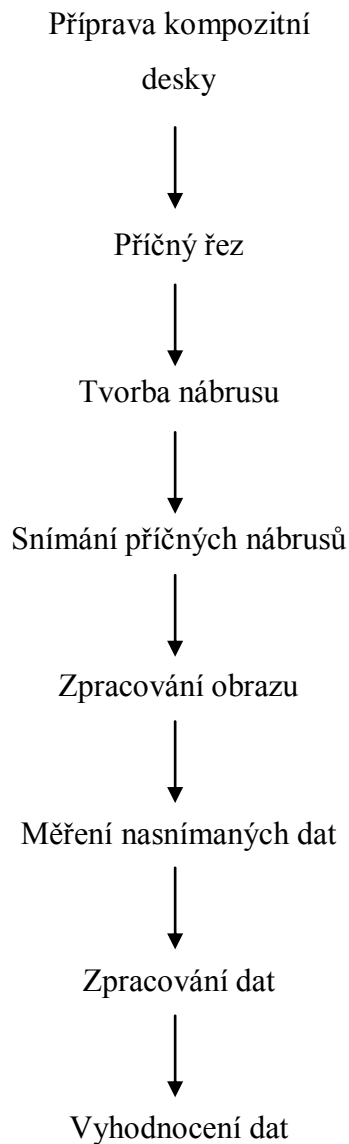
Vlastnosti metylsilikonového laku LUKOSIL M 130 jsou zobrazeny v následující tabulce 3.2.

Tab. 3.2 Vlastnosti LUKOSIL M 130 [18]

Obsah netěkavých složek [%]	50 ± 2
Měrná hmotnost [kg/m ³]	1000 – 1020
Viskozita mPa.s/20°C	30 – 40
Konzistence / 23°C K2 (sekunda)	-
K4 (sekunda)	15 – 21
Číslo kyselosti mg KOH/g	0,02
Třída hořlavosti	2
Doba schnutí [hod]	max. 8

3.3 Popis přípravy

Na obrázku 3.1 je popsán postup získání obrazu.



Obr. 3.1 Postup získání obrazu

Pro zkoumání vnitřní struktury kompozitu byly vytvořeny příčné a podélné řezy. Z každé kompozitní desky se tedy udělaly dva výřezy o velikosti 0,5 cm x 2 cm. V této části přípravy se vyskytly problémy, jako byla delaminace či rozbití vzorků při řezání. U vzorků číslo 9 a 10 došlo k delaminaci vrstev výztuže. A vzorky číslo 11 a 12 byly vlivem mechanického působení při řezání rozlomeny na malé kousky. Takto vytvořené výřezy jsou následně zalité do plastových kroužků samopolymerující bazální pryskyřicí

DURACRYL® PLUS. Podle návodu se mísí v objemovém poměru 3 : 1 (3 díly prášku, 1 díl tekutiny). Doporučuje se postup přisypávání prášku do tekutiny. Pak je nutné směs dokonale promíchat. V takto vytvořené hmotě vzorek kompozitu nezůstal ve svislé poloze, proto bylo nutné zvýšit podíl prášku na 50 gramů a díl tekutiny zůstal 15 mililitrů. Vzorky, které se během řezání delaminovaly, bylo nutné nejdříve z jedné a druhé strany potřít Duracrylem a vytvořit tzv. pouzdro. Při opakovaném řezání se již vyřízly pouze podélné a příčné proužky široké 2 cm, které se celé zalily pryskyřicí. Následovalo uložení na 24 hodin.

Vytvrzené příčné řezy (4x řez) se uložily do upínacího zařízení, které se vloží do brousící hlavy. Nejčastěji se využívá mokrého broušení, kdy se na brousící papír přivádí proud vody, který se stará o odvod nečistot z broušení viz obrázek 3. 2. Nejprve se při malém přitlaku zbrousí plochy řezů a následně se zvolí přitlak $F = 50 \text{ N}$. Brusná hlava se otáčí proti směru otáčení brusného papíru. Otáčky brousící hlavy $n = 100 - 150 \text{ ot./min}$. Broušení probíhá v několika cyklech, viz následující tabulka 3.3. Po každém kroku broušení následovala kontrola, zda je řez dostatečně hladký a bez pryskyřice.

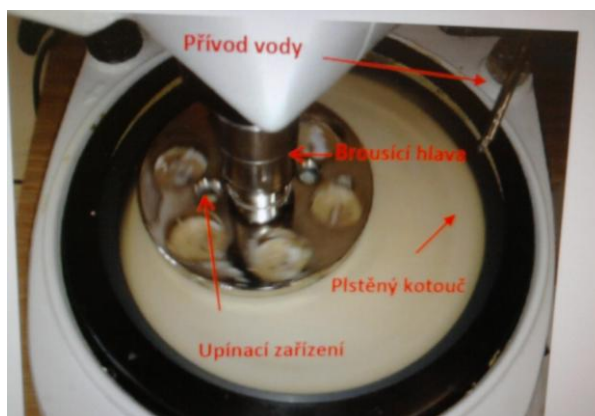
Tab. 3.3 Parametry broušení

Zrnitost brusného papíru ¹	Počet výměn brusného papíru [ks]	Čas broušení [min]
Pro kompozity o teplotě vytvrzení 200 – 250 °C		
320	3	60
600	5	100
2000	2	30
Pro kompozity o teplotě vytvrzení 600 °C		
320	3	60
600	5	100
1000	2	30
Pro kompozity o teplotě vytvrzení 1100 °C		
320	3	60

¹ číslo udává počet zrn na 1 cm^2

Tab. 3.3 Parametry broušení

Zrnitost brusného papíru ¹	Počet výměn brusného papíru [ks]	Čas broušení [min]
600	5	100
1000	2	30
Pro kompozity s vazbou atlas a kepr		
320	3	60
600	5	100
2000	2	30



Obr. 3.2 Bruska příčných řezů [14]

Pokud je řez dostatečně vyhlazen, následuje snímání na přístroji NIS-elements a hodnocení strukturních defektů, viz obrázek 3.3.

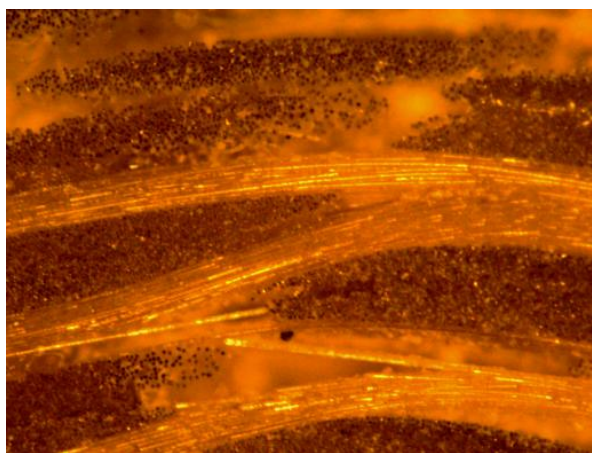


Obr. 3.3 Příčný nábrus a snímání dle [21]

3.4 Popis zkoušek

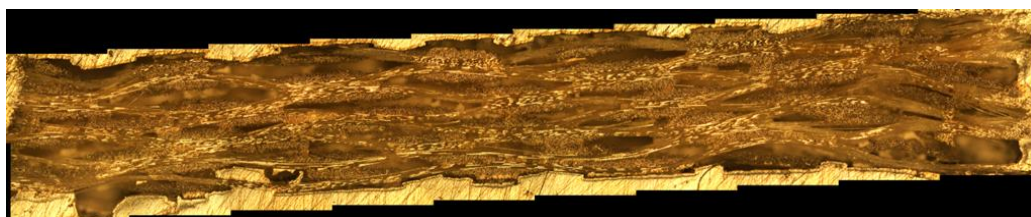
Postup měření strukturních defektů na přístroji NIS-elements byl následovný:

- **Snímání příčných nábrusů pomocí světelné mikroskopie** – již dříve vytvořené nábrusy byly snímány na přístroji NIS-elements. Nejdříve se na podložní sklíčko pomocí modelíny umístily nábrusy. Následně mikroskop vyhledal příčné řezy, poté byl obraz přepnut do počítače. Samotné snímání, viz obrázek 3.4, bylo v záložce snímání, živý-rychle.



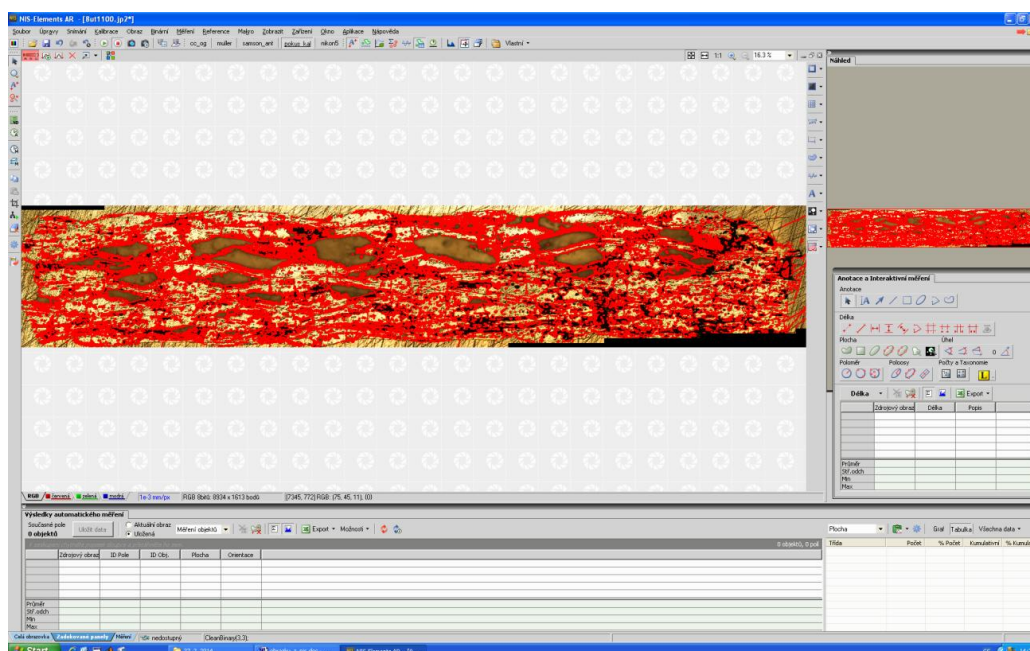
Obr. 3.4 Vzorek 8 o (8 vrstev výztuže, 200°C vytvrzení, osnova – příčná vlákna)

- **Automatické skládání jednotlivých snímků do složeného obrazu** viz obrázek 3.5 – pro skládání jednotlivých snímků bylo nejprve nutné zajistit, aby příčný řez byl v horizontálním směru, aby došlo k úplnému nasnímání všech polí, tedy jednotlivých snímků. V záložce snímání, velký obrázek – automaticky byl nastaven počet polí, která byla snímána. Počet polí bylo nutné nejdříve stanovit pomocí milimetrového papíru, který se umístil pod mikroskop namísto vzorku.



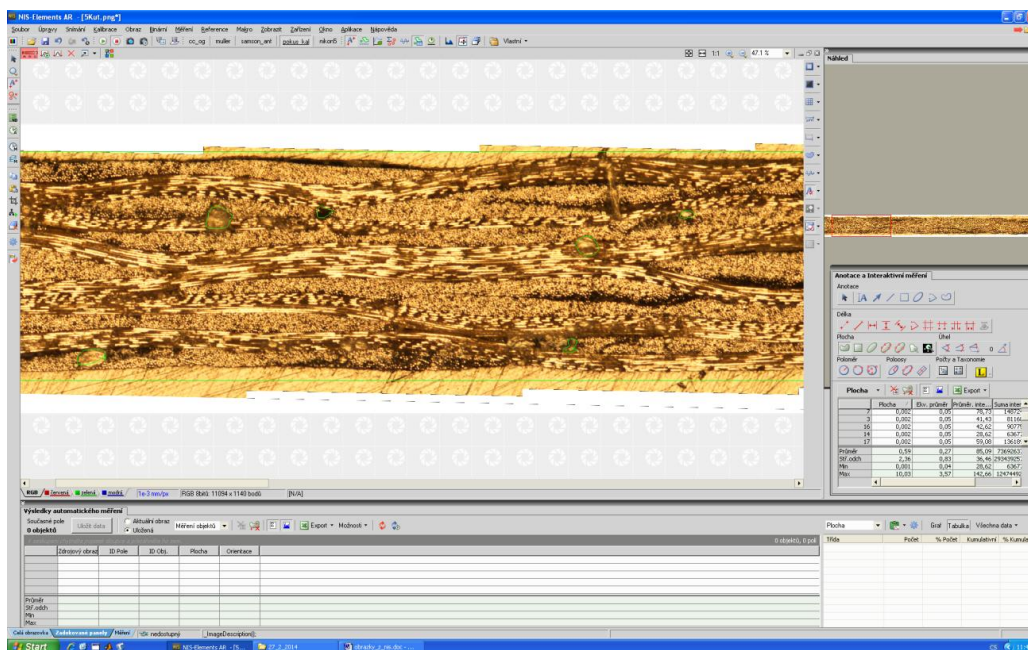
Obr. 3.5 Vzorek 8 ú (8 vrstev výztuže, 200°C vytvrzení, útek -podélná vlákna)

- **Otočení a ořezání snímku, kalibrace** - v případě, že kamera přístroje složila jednotlivé snímky neúplně, bylo nutné výsledný obraz upravit. Před samotným měřením byla ještě provedena kontrola kalibrace jednotlivých nasnímaných složených obrazů.
- **Prahování, binární obraz** – strukturní defekty byly zjištěny pomocí binárního obrazu, kdy bylo nutné nejdříve provést prahování, které bylo v záložce binární, definice prahování a klikem tlačítkem myši na oblasti, které byly označeny jako bubliny či trhliny. Tím nám obraz zčervenal, viz obrázek 3.6. Nakonec byly provedeny morfologické operace na binárním obraze, aby bylo docíleno správného měření.



Obr. 3.6 Ukázka prahování v softwaru NIS-elements

- **Měření nasnímaných dat jednotlivých ploch defektů a celkové plochy kompozitu** – v záložce měření, provést měření byla zjištěna plocha strukturních defektů v mm^2 . Jednotlivé měřené plochy byly označeny zelenou barvou, viz obrázek 3. 5. Nakonec byla naměřena celková plocha kompozitu pro zjištění podílu pórů.



Obr. 3.7 Ukázka měření ploch pórů v softwaru NIS-elements

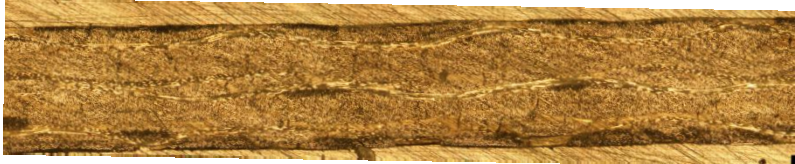
- **Zpracování dat** – naměřené parametry byly vyhodnoceny programem Excel.

4. VÝSKEDKY A DISKUSE

V této části práce budou všechny naměřené bubliny, trhliny a dutiny v nábrusech kompozit s tkaninovou výztuží shodně nazývány póry.

Výsledky měření v mm^2 jsou pro názornost uvedeny pouze u jednoho vzorku. Měření u dalších vzorků jsou uvedena v příloze č. 1. V následující tabulce 4.1 jsou zobrazeny výsledky měření prvního vzorku 1o.

Tab. 4.1 Výsledky měření kompozitu s tkaninovou výztuží

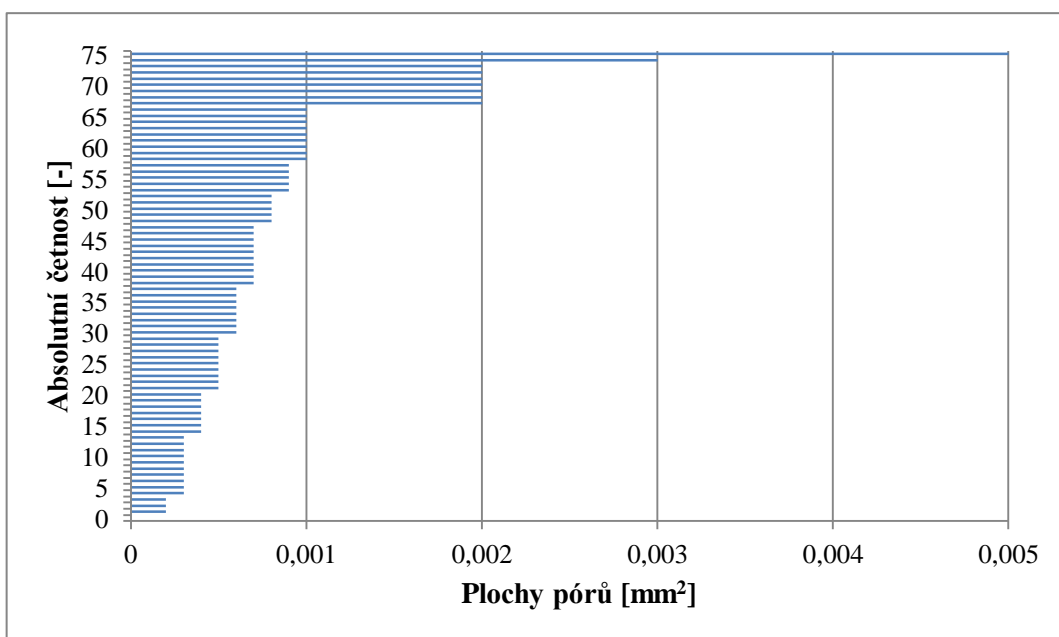
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží				
Vzorek	1o			
Počet vrstev výztuže	6			
Teplota vytvrzení	250			
Vazba výztuže	A 3/1			
Tlak při lisování v MPa	1,4			
Snímání	Osnova – příčná vlákna			
Rastrový obraz				
Naměřená data	0,0002	0,0005	0,0007	
	0,0002	0,0005	0,0007	0,001
	0,0002	0,0005	0,0007	0,001
	0,0003	0,0005	0,0007	0,001
	0,0003	0,0005	0,0007	0,001
	0,0003	0,0005	0,0007	0,001
	0,0003	0,0005	0,0007	0,001
	0,0003	0,0005	0,0008	0,001
	0,0003	0,0005	0,0008	0,002
	0,0003	0,0006	0,0008	0,002
	0,0003	0,0006	0,0008	0,002
	0,0003	0,0006	0,0008	0,002
	0,0003	0,0006	0,0008	0,002
	0,0003	0,0006	0,0009	0,002
	0,0004	0,0006	0,0009	0,002
	0,0004	0,0006	0,0009	0,003
	0,0004	0,0006	0,0009	0,005
	0,0004	0,0007	0,001	

Tab. 4.1 Výsledky měření kompozitu s tkaninovou výztuží

0,0004	0,0007	0,001
0,0004	0,0007	0,001

Fibrogram

Výše naměřené plochy pórů vzniklých v kompozitu byly vzestupně seřazeny a vyneseny do grafů. Nejdříve se použil fibrogram, kde se na ose x vyskytují naměřená data a na ose y je pořadí dat viz obrázek 4.1.



Obr. 4.1 Fibrogram

Z fibrogramu byla zjištěna tato vybočující měření 0,003 a 0,005, proto byla vyloučena z dalšího zpracování. Vybočující měření jsou větší póry, které se vyskytují v kompozitu. Vznik pórů je zapříčiněn unikáním pyrolytických plynů, zejména kyslíku a vodíku jako vedlejších produktů při výrobě. Takto vzniklá bublina prostupuje skrz vlákno mimo kompozit. Jev lze omezit několikanásobným prosycováním jednotlivých vrstev. Po odstranění vybočujících měření bude 73 dat.

Histogram

Pro sestavení histogramu je nutné rozdělit data do tříd četností, viz tabulka 4.2. Tyto třídy se určují podle **Sturgersova pravidla**, které doporučuje volit optimální počet intervalů, nazvaných třeba **k** podle vzorce 1

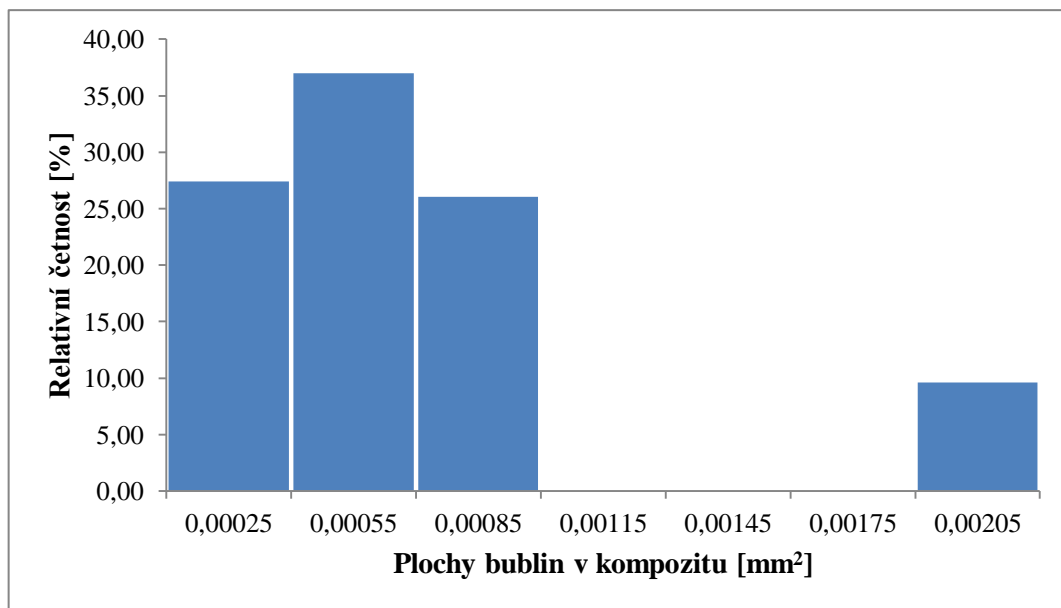
$$k = 1 + 3,3 \log_{10}(n), \quad (1)$$

kde **n** je počet různých hodnot znaku, jež jsou k dispozici. [22]

Z tabulky 4.2 je patrné, že data byla rozdělena do sedmi tříd četností a následně byl sestaven obrázek 4.2.

Tab. 4.2 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

Číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	l _{jd} -l _{jh} [mm]	l _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,0001 - 0,0004	0,00025	20	27
2	0,0004 - 0,0007	0,00055	27	37
3	0,0007 - 0,0010	0,00085	19	26
4	0,0010 - 0,0013	0,00115	0	0
5	0,0013 - 0,0016	0,00145	0	0
6	0,0016 - 0,0019	0,00175	0	0
7	0,0019 - 0,0022	0,00205	7	10
Σ			73	100



Obr. 4.2 Histogram

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení. V pravé části grafu se nachází odlehlá měření.

Statistické vyhodnocení naměřených dat

V následující tabulce 4.3 jsou zpracována všechna naměřená data u všech typů vzorků.

Tab. 4.3 Statistické vyhodnocení naměřených dat u kompozit s tkaninovou výztuží

Vzorek	\bar{X} [mm²]	Me [mm²]	s [mm²]	v	95% IS [%]	
1o	0,000743	0,0006	0,00047	156,63	0,00063	0,00085
1ú	0,000815	0,0007	0,00057	141,91	0,00059	0,00104
2 o	0,001729	0,0010	0,00208	83,14	0,00091	0,00183
2 ú	0,000796	0,0006	0,00053	149,04	0,00058	0,00101
3 o	0,001190	0,0010	0,00093	127,37	0,00077	0,00161
3 ú	0,000806	0,0007	0,00040	199,52	0,00061	0,00100

Tab. 4.3 Statistické vyhodnocení naměřených dat u kompozit s tkaninovou výztuží

Vzorek	$\bar{X} [mm^2]$	$Me [mm^2]$	$s [mm^2]$	v	95% IS [%]	
4 o	0,002091	0,0020	0,00114	183,48	0,00170	0,00249
4 ú	0,005688	0,0070	0,00398	142,95	0,00374	0,00764
5 o	0,003335	0,0010	0,00399	83,48	0,00158	0,00509
5 ú	0,003259	0,0030	0,00277	117,76	0,00194	0,00457
6 o	0,002833	0,0020	0,00244	115,96	0,00145	0,00422
6 ú	0,002836	0,0010	0,00361	78,59	0,00070	0,00497
7 o	0,016667	0,0200	0,00707	235,70	0,01205	0,02129
7 ú	0,031000	0,0250	0,02331	132,99	0,01655	0,04545
8 o	0,020000	0,0200	0,00816	244,95	0,01200	0,02800
8 ú	0,014818	0,0100	0,00997	148,66	0,00893	0,02071
9 o	0,017143	0,0200	0,00488	351,32	0,01353	0,02076
9 ú	0,007727	0,0100	0,00323	239,40	0,00582	0,00963
10 o	0,019091	0,0200	0,01045	182,78	0,01292	0,02526
10 ú	0,031667	0,0350	0,01835	172,58	0,01698	0,04635
11 o	0,001786	0,0009	0,00247	72,34	0,00172	0,00185
11 ú	0,000688	0,0002	0,00169	40,65	0,00060	0,00078
12 o	0,000885	0,0003	0,00154	57,40	0,00085	0,00092
12 ú	0,000739	0,0004	0,00120	61,58	0,00072	0,00076

Pro obsazení celého systému naměřených dat od nejmenších až po největší bylo nutné rozdělit měření do tří intervalů a to dle velikosti měřených pórů. Tyto intervaly spolu s počty měření jsou popsány v tabulce 4.4.

Tab. 4.4 Rozdělení naměřených ploch bublin do intervalů četností

Vzorek	<0,000001 - 0,001)	<0,001 - 0,01)	<0,01 - ∞)
1o	66	-	-
1ú	19	4	-
2 o	11	12	-
2 ú	17	5	-
3 o	9	10	1
3 ú	10	6	-
4 o	5	27	-
4 ú	-	9	9
5 o	6	9	5
5 ú	2	13	3
6 o	-	11	1
6 ú	2	7	2
7 o	-	-	9
7 ú	-	-	10
8 o	-	-	4
8 ú	-	1	10
9 o	-	-	8
9 ú	-	4	7
10 o	-	-	11
10 ú	-	-	6
11 o	2625	2870	371

Tab. 4.4 Rozdělení naměřených ploch bublin do intervalů četností

Vzorek	<0,000001 - 0,001)	<0,001 - 0,01)	<0,01 - ∞)
11 ú	1075	155	33
12 o	5114	1674	120
12 ú	11783	2988	153

Z tabulky 4.4 lze vyčíst, že nejvíce pórů bylo naměřeno v prvním intervalu a to především u vzorků s tkaninovou výztuží v atlasové a keprové vazbě. Dále u teploty vytvrzení 1100 °C. Jedná se sice o malé póry, ale vzhledem k velkému počtu mají vliv na výsledné vlastnosti jako je např. pevnost. Ale záleží na druhu použití kompozit, např. pokud chceme, aby plaval na vodě, je velké množství malých pórů žádoucí. V třetím intervalu od velikosti ploch pórů 0,01 mm² se nejvíce vyskytovaly póry naměřené u kompozit s teplotami vytvrzení 200 a 600 °C.

4.1 Plošný podíl pórů

Z naměřených dat byl u každého vzorku vypočítán podíl pórů v kompozitu **P** pomocí vzorce 2:

$$P = \frac{S_p}{S_c} 100 [\%], \quad (2)$$

kde **S_c** celková měřená plocha kompozitu (resp. nábrusu), **S_p** součet naměřených ploch pórů v kompozitu.

Vypočítané hodnoty jsou zobrazeny v následující tabulce 4.5.

Tab. 4.5 Plošný podíl pórů v kompozitu s tkaninovou výztuží

Vzorek	S_C [mm ²]	S_P [mm ²]	P [%]
1o	8,0	0,06	0,78
1ú	6,9	0,04	0,59
2 o	6,4	0,04	0,64
2 ú	6,8	0,02	0,31
3 o	14,1	0,03	0,23
3 ú	12,8	0,01	0,10
4 o	12,4	0,07	0,54
4 ú	11,1	0,11	1,00
5 o	10,9	0,07	0,61
5 ú	10,7	0,08	0,71
6 o	17,6	0,03	0,19
6 ú	16,3	0,03	0,19
7 o	17,6	0,15	0,85
7 ú	27,9	0,31	1,11
8 o	31,9	0,08	0,25
8 ú	36,4	0,16	0,45
9 o	30,1	0,18	0,60
9 ú	20,8	0,09	0,41
10 o	35,1	0,21	0,60
10 ú	30,2	0,19	0,63
11 o	30,3	10,99	36,26

Tab. 4.5 Plošný podíl pórů v kompozitu s tkaninovou výztuží

Vzorek	S_C [mm ²]	S_P [mm ²]	P [%]
11 ú	27,2	1,07	3,94
12 o	25,7	7,33	28,51
12 ú	25,2	14,17	56,27

Na obrázku 4.3 je grafické zhodnocení velikosti pórů u všech vzorků, kde bodově je vyznačen průměr. Dále je zobrazena maximální či minimální hodnota velikosti ploch u daného vzorku. Pro přehlednost jsou hodnoty také zobrazeny v následující tabulce 4.6, kde:

maximum největší naměřená plocha póru v nábrusu kompozitu,

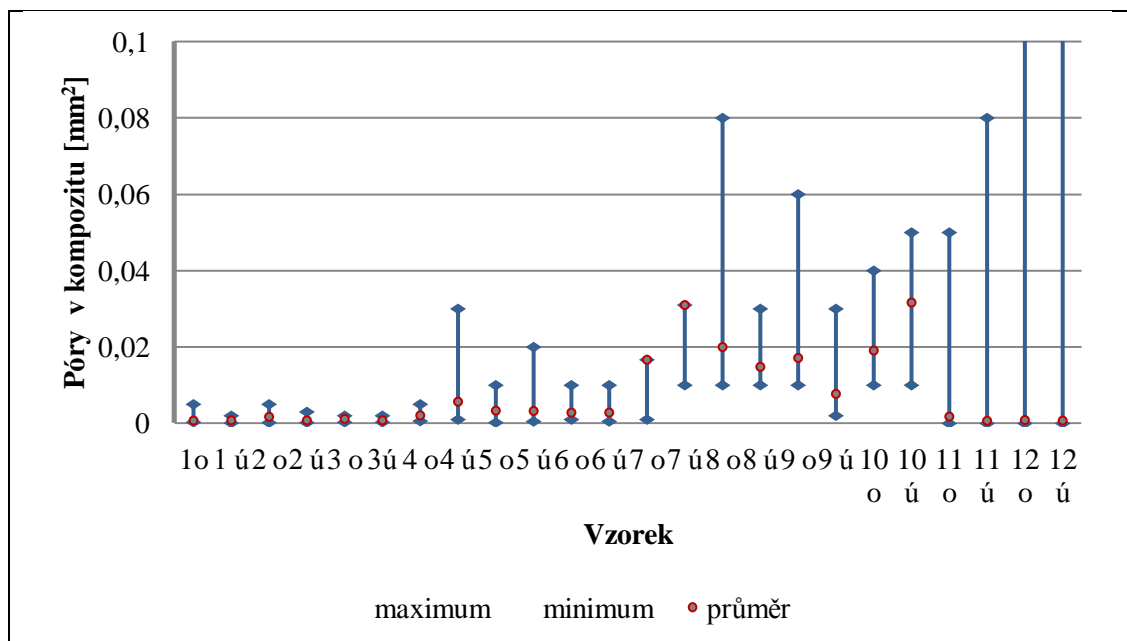
minimum nejmenší naměřená plocha póru v nábrusu kompozitu.

Tab. 4.6 Plochy pórů v kompozitu

Vzorek	\bar{x} [mm ²]	maximum[mm ²]	minimum [mm ²]
1o	0,000743	0,005	0,0003
1ú	0,000815	0,002	0,0001
2 o	0,001729	0,005	0,0002
2 ú	0,000796	0,003	0,0002
3 o	0,001190	0,002	0,0003
3 ú	0,000806	0,002	0,0003
4 o	0,002091	0,005	0,0006
4 ú	0,005688	0,03	0,001

Tab. 4.6 Plochy pórů v kompozitu

Vzorek	\bar{X} [mm ²]	maximum[mm ²]	minimum [mm ²]
5 o	0,003335	0,01	0,0002
5 ú	0,003259	0,02	0,0005
6 o	0,002833	0,01	0,001
6 ú	0,002836	0,01	0,0005
7 o	0,016667	0,01	0,001
7 ú	0,031000	0,03	0,01
8 o	0,020000	0,08	0,01
8 ú	0,014818	0,03	0,01
9 o	0,017143	0,06	0,01
9 ú	0,007727	0,03	0,002
10 o	0,019091	0,04	0,01
10 ú	0,031667	0,05	0,01
11 o	0,001786	0,05	0,0000002
11 ú	0,000688	0,08	0,0000002
12 o	0,000885	0,13	0,0000002
12 ú	0,000739	0,2	0,0000002



Obr. 4.3 Grafické zhodnocení velikosti pórů u všech vzorků

Z obrázku 4.3 je patrné, že v kompozitech 4 až 12 je největší rozptyl pórů.

4.2 Závislost tlaku při výrobě na podíl pórů v kompozitu

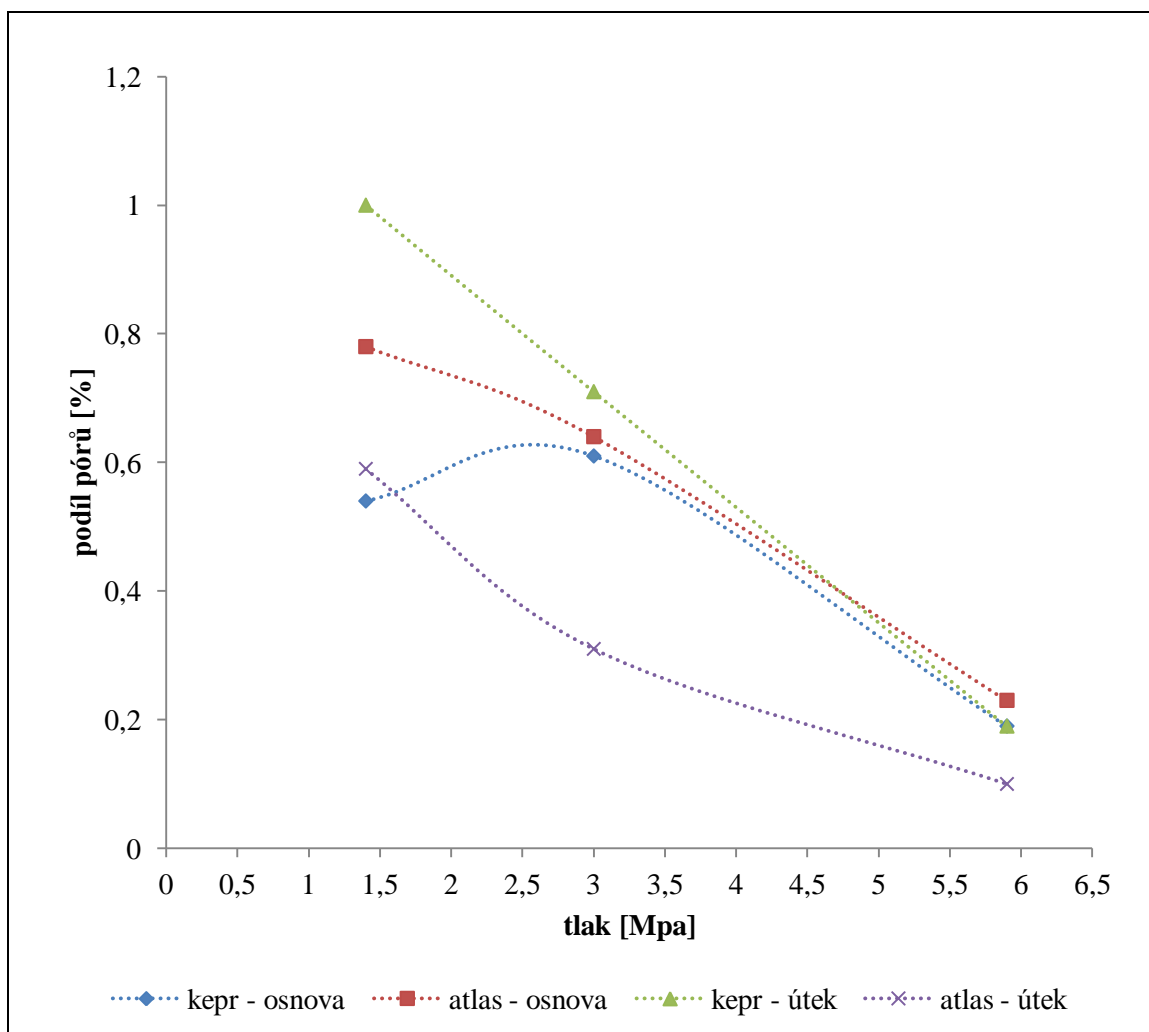
Z vypočtených hodnot plošného podílu pórů byla zjišťována závislost tlaku při výrobě, viz obrázek 4.4. Použité vzorky kompozit s tkaninovou výztuží byly v atlasové a keprové vazbě vyrobené s použitím tlaků 1,4, 3 a 5,9 MPa viz následující tabulka 4.7. Hodnoty podílu pórů jsou měřeny na vzorcích 1 – 6, jedná se o hodnoty osnovy (příčných vláken) a útku (podélných vláken) od každého vzorku.

Tab. 4.7 Hodnoty pórovitosti při různém tlaku použité při výrobě kompozitu

Tlak [Mpa]	Vazba			
	Atlas - osnova	Atlas – útek	Kepr - osnova	Kepr - útek
1,4	0,78	0,59	0,54	1,00
3	0,64	0,31	0,61	0,71

Tab. 4.7 Hodnoty pórovitosti při různém tlaku použité při výrobě kompozitu

Tlak [Mpa]	Vazba			
	Atlas - osnova	Atlas – útek	Kepr - osnova	Kepr - útek
5,9	0,23	0,10	0,19	0,19



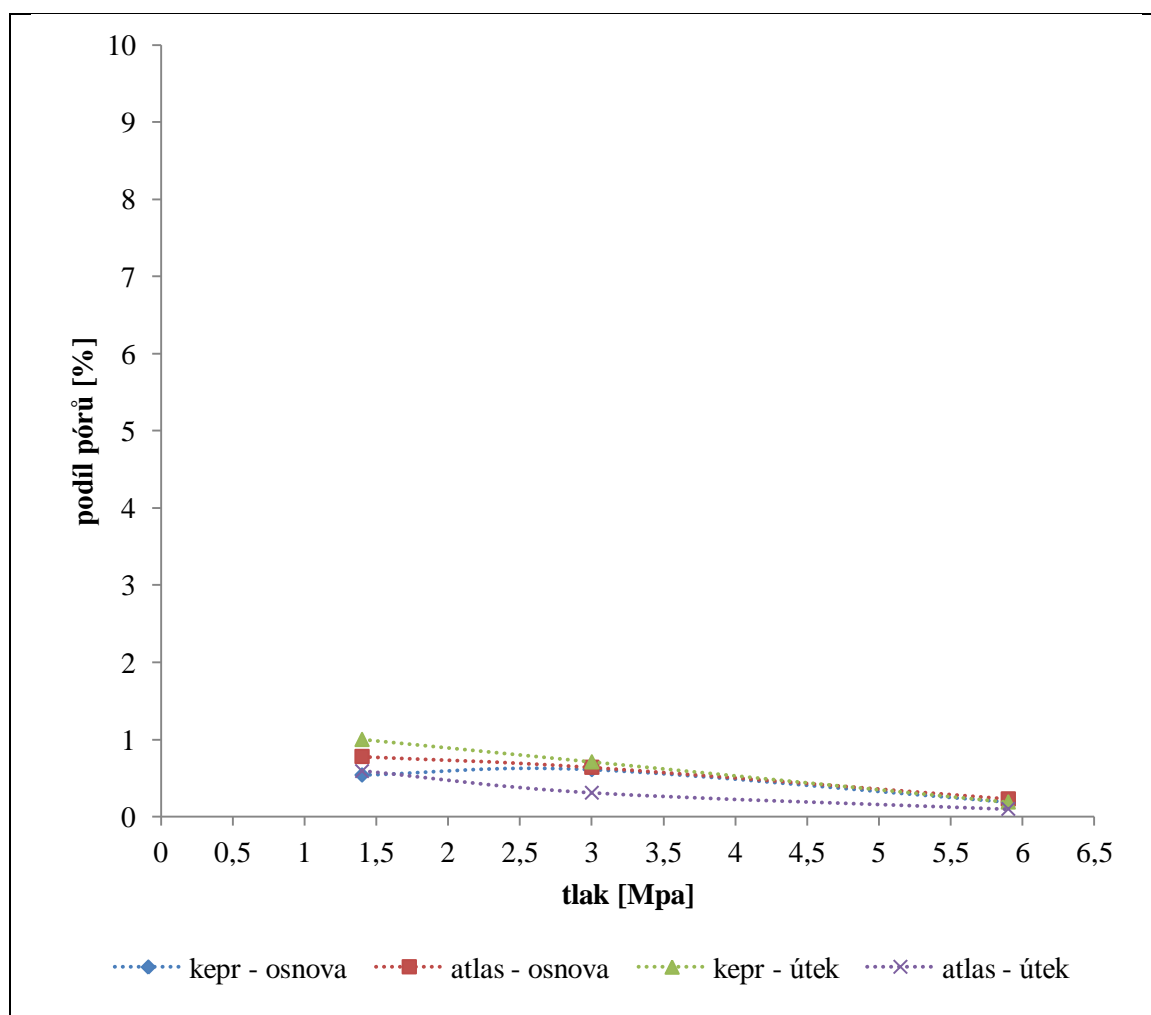
Obr. 4.4 Grafické zhodnocení závislosti tlaku na podíl pórů

Přerušovaná čára v obrázcích 4.4 až 4.6 pouze naznačuje předpokládaný průběh (trend).

Z obrázku 4.4 je patrné, že se zvyšujícím se tlakem klesá plošný podíl pórů v kompozitu s tkaninovou výztuží v atlasové i keprové vazbě. Největší rozdíl představuje keprová vazba v útku, tedy podélných vláknech, kde plošný podíl je mezi měřeními

vzorky největší. Vysvětlením je fakt, že v keprové vazbě jsou útkové nitě při tkaní méně napnuté než osnovní, proto póry vzniklé při výrobě kompozitu zůstávají mezi vrstvami. Keprová vazba je i více provázanější než atlasová. Vzduch, který vznikne při výrobě mezi jednotlivými vrstvami, se hůře dostává na povrch v keprové vazbě a tím vznikají póry ve vytvrzeném kompozitu.

Pokud by byl obrázek 4.4 studován v širším měřítku, viz následující obrázek 4.5, lze zjistit, že se pórovitost v závislosti na tlaku nemění. Což by znamenalo, že vliv tlaku i vazby na pórovitost je v obou případech stejný. Tuto hypotézu je možné otestovat pomocí statistické závislosti, viz kapitola 4.4.



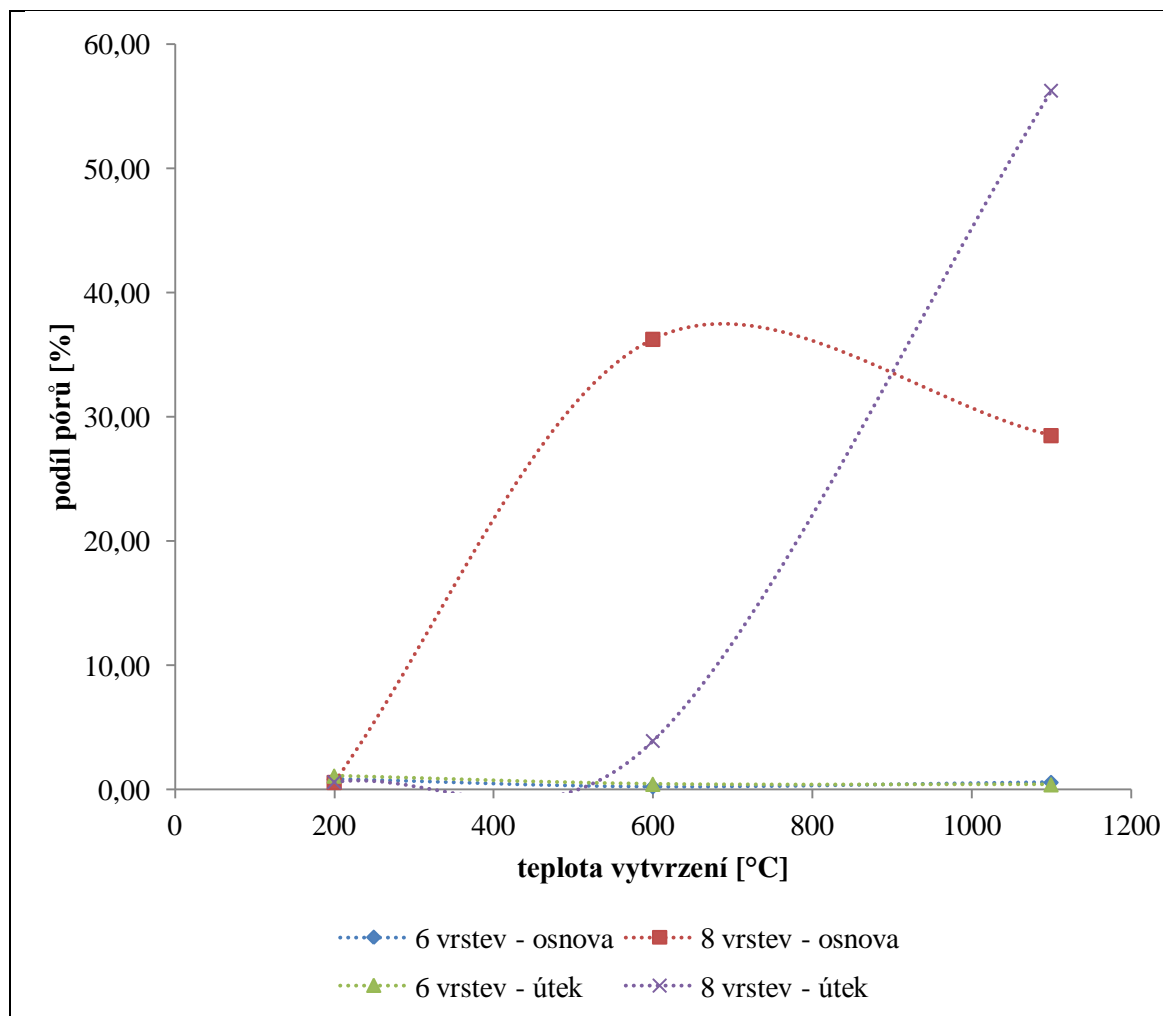
Obr. 4.5 Grafické zhodnocení závislosti tlaku na podíl pórů – jiné měřítko

4.3 Závislost teploty při výrobě na podíl pórů v kompozitu

Dále z vypočtených hodnot byla zjišťována závislost teploty při výrobě na pórovitost plošný podíl pórů kompozit, viz obrázek 4.6. Použité vzorky kompozit s tkaninovou výztuží byly plátňové vazby vyrobené při teplotě 200, 600 a 1100 °C viz následující tabulka 4.8. Hodnoty podílu pórů jsou měřeny na vzorcích 7 – 12.

Tab. 4.8 Hodnoty pórovitosti při různé teplotě použité při výrobě kompozitu

teplota vytvrzení [°C]	vazba			
	plátňo			
	6 vrstev výztuže - osnova	6 vrstev výztuže - útek	8 vrstev výztuže - osnova	8 vrstev výztuže - útek
200	0,85	1,11	0,60	0,63
600	0,25	0,45	36,26	3,94
1100	0,60	0,41	28,51	56,27



Obr. 4. 6 Grafické zhodnocení vlivu teploty na pórovitost

Na obrázku 4.6 modrá barva označuje kompozit s šesti vrstvami výztuže, kde teplota vytvrzení nemá téměř žádný vliv na plošný podíl pórů v kompozitu. Tuto hypotézu je rovněž vhodné otestovat, viz kapitola 4.5. Červená barva značí kompozit s osmi vrstvami výztuže. Vyšší teplota vytvrzení má významný vliv na plošný podíl pórů v kompozitu. Při teplotě 1100 °C se jedná o keramiku (matrice vlivem teploty přechází do keramiky).

4.4 Statistická závislost – analýza rozptylu (ANOVA)

Analýza rozptylu, označovaná také jako ANOVA (z anglického analysis of variance), se v technické praxi používá buď jako samostatná technika, nebo jako postup umožňující analýzu zdrojů variability v lineárních statistických modelech. Ze statistického hlediska lze analýzu rozptylu chápat jako speciální případ regresní analýzy, kde vysvětlující proměnné mají pouze binární charakter a mohou nabývat pouze hodnoty 0 nebo 1.

Veličina μ_i se rozkládá na složku odpovídající celkovému průměru μ ze všech úrovní faktoru a efektu i -té úrovně daného faktoru α_i viz vzorec 3.

$$\mu_i = \mu + \alpha_i. \quad (3)$$

Účelem analýzy rozptylu je testování shody jednotlivých úrovní, čili nulové hypotézy $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$. [23]

V této práci byla použita jednofaktorová analýza rozptylu. Při třídění podle jednoho faktoru zkoumáme jeho vliv na výsledek experimentu. V tomto případě je faktorem tlak.

Pro zjištění **vlivu tlaku** na plošný podíl pórů se nejprve stanoví nulová a alternativní hypotéza.

- Nulová hypotéza $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$, tlak nemá vliv na podíl pórů
- Alternativní hypotéza $H_A: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$, tlak má vliv na podíl pórů

μ_1 představuje tlak 1,4 Mpa, μ_2 tlak 3 Mpa a μ_3 tlak 5,9 Mpa.

Vzhledem k velkému množství dat byl pro výsledné zpracování použit program Excel 2007 MS Office. V tabulkách 4.9 a 4.10 jsou uvedeny výsledky hypotézy u kompozitu s tkaninovou výztuží v atlasové vazbě, v tabulkách 4.11 a 4.12 s tkaninovou výztuží v keprové vazbě. Porovnány jsou odděleně osnovy – příčná vlákna a útky – podélná vlákna. Vzorky v atlasové i keprové vazbě byly vytvrzené při stejné teplotě, tedy 200 °C.

Tab. 4.9 Výsledky testu Anova: jeden faktor v programu Excel pro kompozit s tkaninovou výztuží v atlasové vazbě v osnově, příčných vláknech

Faktor					
Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl	
0,0003	25	0,0319	0,001276	1,04E-06	
0,0002	22	0,0313	0,001422	1,27E-06	
0,0003	19	0,0323	0,0017	4,87E-06	

ANOVA

Zdroj				Hodnota		
variability	SS	Rozdíl	MS	F	P	F krit
Mezi výběry	1,96016E-06	2	9,80079E-07	0,443748	0,643617	3,142809
Všechny						
výběry	0,000139144	63	2,20864E-06			
Celkem	0,000141104	65				

Výsledek testování: Kritický obor je $W_\alpha : F \leq F_{\text{krit}}$, na hladině významnosti 0,05 nezamítáme nulovou hypotézu o rovnosti středních hodnot. S pravděpodobností 95 % můžeme tvrdit, že tlak neovlivňuje podíl pórů v kompozitu s tkaninovou výztuží v atlasové vazbě v osnově, tedy příčných vláknech.

Tab. 4.10 Výsledky testu Anova: jeden faktor v programu Excel pro kompozit s tkaninovou výztuží v atlasové vazbě v útku, podélných vláknech

Faktor					
Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl	
0,0001	25	0,0211	0,000844	3,22E-07	
0,0002	23	0,0211	0,000917	4,74E-07	
0,0003	15	0,0126	0,00084	1,55E-07	

ANOVA

Zdroj				Hodnota		
variability	SS	Rozdíl	MS	F	P	F krit

Tab. 4.10 Výsledky testu Anova: jeden faktor v programu Excel pro kompozit s tkaninovou výztuží v atlasové vazbě v útku, podélných vláknech

Mezi výběry	8,20549E-08	2	4,10275E-08	0,121081	0,886178	3,150411
Všechny						
výběry	2,03306E-05	60	3,38844E-07			
Celkem	2,04127E-05	62				

Výsledek testování: Kritický obor je $W\alpha : F \leq F_{\text{krit}}$, na hladině významnosti 0,05 nezamítáme nulovou hypotézu o rovnosti středních hodnot. S pravděpodobností 95 % můžeme tvrdit, že tlak neovlivňuje podíl pórů v kompozitu s tkaninovou výztuží v atlasové vazbě v útku, tedy podélných vláknech.

Tab. 4.11 Výsledky testu Anova: jeden faktor v programu Excel pro kompozit s tkaninovou výztuží v keprové vazbě v osnově, příčných vláknech

Faktor					
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>	
0,0006	30	0,0613	0,002043333	1,02E-06	
0,0002	19	0,0665	0,0035	1,63E-05	
0,001	11	0,033	0,003	6,2E-06	

ANOVA

<i>Zdroj variability</i>	<i>Hodnota</i>					
	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	2,60623E-05	2	1,30312E-05	1,932433	0,154164	3,158843
Všechny						
výběry	0,000384374	57	6,7434E-06			
Celkem	0,000410436	59				

Výsledek testování: Kritický obor je $W\alpha : F \leq F_{\text{krit}}$, na hladině významnosti 0,05 nezamítáme nulovou hypotézu o rovnosti středních hodnot. S pravděpodobností 95 % můžeme tvrdit, že tlak neovlivňuje podíl pórů v kompozitu s tkaninovou výztuží v keprové vazbě v osnově, tedy příčných vláknech.

Tab. 4.12 Výsledky testu Anova: jeden faktor v programu Excel pro kompozit s tkaninovou výztuží v keprové vazbě v útku, podélných vláknech

Faktor					
Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl	
0,001	17	0,14	0,008235294	5,63E-05	
0,0005	16	0,0549	0,00343125	7,63E-06	
0,0005	10	0,0307	0,00307	1,38E-05	

ANOVA

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	P	F krit
Mezi výběry	0,000251953	2	0,000125976	4,421255	0,018418	3,231727
Všechny výběry	0,001139734	40	2,84934E-05			
Celkem	0,001391687	42				

Výsledek testování: Kritický obor je $W\alpha : F \geq F_{\text{krit}}$, na hladině významnosti 0,05 zamítáme nulovou hypotézu o rovnosti středních hodnot. S pravděpodobností 95 % můžeme tvrdit, že tlak ovlivňuje podíl pórů v kompozitu s tkaninovou výztuží v keprové vazbě v útku, tedy podélných vláknech.

4.5 Leveneův test (test variability)

Analýzou ANOVA byly porovnávány průměry výběrů, proto bylo vhodné hypotézu otestovat i na shodu rozptylů. K tomu byl vhodný Leveneův test pro testování tří nezávislých spojitých proměnných. K výpočtu byl použit, jako v předchozím případě, program Excel.

Pro zjištění **vlivu tlaku** na podíl pórů se nejprve stanoví nulová H_0 a alternativní hypotéza H_A .

- $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$ Rozptyly ploch pórů, z nichž pocházejí analyzované výběry, lze považovat za shodné.

- $H_A: \overline{H_0}$ Rozptyly ploch pórů, z nichž pocházejí analyzované výběry, nelze považovat za shodné.
 σ^2_1 představuje tlak 1,4 MPa, σ^2_2 3 MPa a σ^2_3 5,9 MPa.

Leveneův test pro tkaninovou výztuž v atlasové vazbě v osnově, příčných vláknech:

Testové kritérium: 0,43

p-hodnota: 0,6499

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 nezamítáme H_0 .

Leveneův test pro tkaninovou výztuž v atlasové vazbě v útku, podélných vláknech:

Testové kritérium: 4,76

p-hodnota: 0,0119

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 .

Leveneův test pro tkaninovou výztuž v keprové vazbě v osnově, příčných vláknech:

Testové kritérium: 33,94

p-hodnota: 0

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 .

Leveneův test pro tkaninovou výztuž v keprové vazbě v útku, podélných vláknech:

Testové kritérium: 297,14

p-hodnota: 0

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 .

Tlak při výrobě kompozitu nemá vliv na podíl pórů pouze v prvním případě, tedy když je tkaninová výztuž v atlasové vazbě v osnově, příčných vláknech. V ostatních případech musíme hypotézu zamítnout. Atlasová vazba je méně provázaná než keprová, proto při výrobě stačí malý tlak k vytlačení vzduchu z vrstev. Stejně tomu je u osnovních nití, které jsou více napnuté než nitě útkové, proto se zde nevytváří prostor pro póry. Více je tento problém popsán v kapitole 4.2.

Pro zjištění **vlivu teploty** na podíl pórů v kompozitu byl též použit Leveneův test. Nejprve se stanoví nulová H_0 a alternativní hypotéza H_A .

- $H_0: \sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \sigma^2_3$ Rozptyly ploch pórů, z nichž pocházejí analyzované výběry, lze považovat za shodné.
- $H_A: \overline{H_0}$ Rozptyly ploch pórů, z nichž pocházejí analyzované výběry, nelze považovat za shodné.

σ^2_1 představuje teplotu 200 °C, σ^2_2 600 °C a σ^2_3 1100 °C.

Leveneův test pro kompozit s šesti vrstvami tkaninové výztuže v plátnové vazbě v osnově, příčných vláknech:

Testové kritérium: 367,53

p-hodnota: 0

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 .

Leveneův test pro kompozit s šesti vrstvami tkaninové výztuže v plátnové vazbě v útku, podélných vláknech:

Testové kritérium: 339,11

p-hodnota: 0

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 .

Leveneův test pro kompozit s osmi vrstvami tkaninové výztuže v plátnové vazbě v osnově, příčných vláknech:

Testové kritérium: 1476,39

p-hodnota: 0

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 .

Leveneův test pro kompozit s osmi vrstvami tkaninové výztuže v plátnové vazbě v útku, podélných vláknech:

Testové kritérium: 1344,77

p-hodnota: 0

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 .

Teplota vytvrzení má významný vliv na podíl pórů v kompozitu. Nejvíce pórů bylo naměřeno v kompozitech vytvrzených při teplotě 1100 °C. Při této teplotě docházelo též k destrukci kompozitu vlivem velkého počtu pórů. Nejméně pórů bylo naměřeno při teplotě 200 °C.

4.6 Funkční závislost - ověření hypotézy dvouvýběrovým t-testem

Dvouvýběrový test lze použít v případě, kdy jsou výběry mezi sebou nezávislé. Tedy mezi hodnotami výběrů není žádná souvislost. Navíc se musí předpokládat, že rozptyly (směrodatné odchylky) obou výběrů jsou totožné. Jeho myšlenka je založena na porovnávání průměrů z obou výběrů. Rozdíl těchto průměrů má podle matematických propočtů normální rozdělení.

Odhad se provádí pomocí vzorce:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n+m-2} \left(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 + \sum_{j=1}^m (Y_j - \bar{Y})^2 \right)} \quad (4)$$

kde X_1, \dots, X_n jsou hodnoty prvního výběru, Y_1, \dots, Y_m hodnoty druhého výběru a \bar{X}_n a \bar{Y}_m průměry prvního, resp. druhého výběru. [22]

Testová statistika pro dvouvýběrový t-test

$$T = \frac{\bar{X}_n - \bar{Y}_m}{s} \sqrt{\frac{nm}{(n+m)}} \quad (5)$$

Vzhledem k velkému množství dat byl pro výsledné zpracování použit program Excel 2007 MS Office. Pomocí statistického modulu programu Excel najdeme přesnou p-hodnotu. Tato pravděpodobnost odpovídá pravděpodobnosti výskytu takového nebo ještě extrémnější hodnoty testového kritéria t za předpokladu platnosti nulové hypotézy. Pokud je menší než 0,05, nulovou hypotézu zamítáme. Znamená to, že pravděpodobnost, že by pozorované rozdíly vznikly pouze náhodou, je menší než 5 %.

Dvouvýběrový t-test byl zvolen pro porovnání **vlivu vazby** tkaninové výztuže. Nejprve se stanoví nulová a alternativní hypotéza:

- Nulová hypotéza: atlas a kepr nemá vliv na podíl pórů
- Alternativní hypotéza: atlas a kepr nemá vliv na podíl pórů

V tabulce 4.13 jsou uvedeny výsledky hypotézy při tlaku 1,4 MPa, v tabulce 4.14 pro tlak 3 MPa a v tabulce 4.15 pro tlak 5,9 MPa. Porovnány jsou odděleně osnovy – příčná vlákna a útky – podélná vlákna. Vzorky v atlasové i keprové vazbě byly vytvrzené při stejné teplotě, tedy 250 °C.

Soubor 1 představuje atlas, Soubor 2 kepr.

Tab. 4.13 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro tlak 1,4 MPa

Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů				
tlak	1,4 MPa			
Vzorek	1o	4o	1ú	4ú
	Soubor 1	Soubor 2	Soubor 1	Soubor 2
Rozptyl	1,04E-06	1,02E-06	3,22E-07	5,63E-05
Pozorování	25	30	25	17
Společný rozptyl	1,03E-06		2,27E-05	
Rozdíl	53		40	
t Stat	-2,7974		-4,93277	
P(T<=t) (1)	0,003582		7,33E-06	
t krit (1)	1,674116		1,683851	
P(T<=t) (2)	0,007165		1,47E-05	
t krit (2)	2,005746		2,021075	
Závěr	má vliv	t<0,05	má vliv	t<0,05

Rozptyl nám udává hodnotu rozptylu v obou souborech. V řádku Pozorování je uvedeno, kolik osob bylo zařazeno do jednotlivých souborů. Společný rozptyl pro 1. a 2. soubor. Položka „Rozdíl“ udává počet stupňů volnosti. K výpočtu bylo použito

vzorce $n_1 + n_2 - 2 = 25 + 30 - 2 = 53$. Dále je uvedena hodnota testového kritéria t_{Stat} , dosažená hladina statistické významnosti $P(1)$ pro jednostranný test (1) a kritická hodnota t_{krit} pro jednostranný test. Vzhledem k oboustranné formulaci alternativní hypotézy nás zajímá hladina dosažené statistické významnosti pro oboustranný test $P(2) = 0,007$. Je zřejmé, že dosažená hodnota signifikance je podstatně menší než stanovená hladina 0,05, je tedy oprávněné zamítnout nulovou hypotézu.

Výsledek testování: Zamítáme nulovou hypotézu: atlas a kepr nemá vliv na podíl pórů. Dvouvýběrovým t-testem bylo prokázáno, že ve výztuži v keprové vazbě je více pórů než v atlasové při tlaku 1,4 MPa.

Tab. 4.14 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro tlak 3 MPa

Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů				
tlak	3 MPa			
Vzorek	2o	5o	2ú	5ú
	Soubor 1	Soubor 2	Soubor 1	Soubor 2
Rozptyl	1,27E-06	1,63E-05	4,74E-07	7,63E-06
Pozorování	22	19	23	16
Společný rozptyl	8,19E-06		3,37E-06	
Rozdíl	39		37	
t Stat	-2,31711		-4,20348	
P(T<=t) (1)	0,012919		7,97E-05	
t krit (1)	1,684875		1,687094	
P(T<=t) (2)	0,025838		0,000159	
t krit (2)	2,022691		2,026192	
Závěr	má vliv	$t < 0,05$	má vliv	$t < 0,05$

Výsledek testování: Zamítáme nulovou hypotézu: atlas a kepr nemá vliv na podíl pórů. Při tlaku 3 MPa má použitá vazba vliv na podíl pórů v kompozitu.

Tab. 4.15 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro tlak 5,9 MPa

Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů				
tlak	5,9 MPa			
Vzorek	3o	6o	3ú	3ú
	Soubor 1	Soubor 2	Soubor 1	Soubor 2
Rozptyl	4,87E-06	6,2E-06	1,55E-07	1,38E-05
Pozorování	19	11	15	10
Společný rozptyl	5,34E-06		5,5E-06	
Rozdíl	28		23	
t Stat	-1,48456		-2,32992	
P(T<=t) (1)	0,074416		0,014473	
t krit (1)	1,701131		1,713872	
P(T<=t) (2)	0,148832		0,028947	
t krit (2)	2,048407		2,068658	
Závěr	nemá vliv	$t > 0,05$	má vliv	$t < 0,05$

Výsledek testování: V porovnání příčných vláken musíme hypotézu přijmout a při porovnání podélných vláken ji zase zamítáme. Znamenalo by to, že při tlaku 5,9 MPa má druh použité vazby vliv na podíl pórů pouze v útku, tedy podélných vláken. To je možné vysvětlit velkým tlakem při lisování. Též zde tento rozdíl způsobují nitě, které jsou v osnově více napnuté než v útku tj. princip tkaní, kdy vzduchové bubliny způsobující póry mohou z vrstev kompozitu lépe unikat.

Dále byla zkoumána závislost mezi **počtem vrstev tkaninové výztuže** v kompozitu a jeho vlivem na podíl pórů v kompozitu. To bylo zjišťováno na vzorcích kompozit s 6 a 8 vrstvami výztuže vyrobené při teplotách 200, 600 a 1100 °C.

Nulová a alternativní hypotéza pro porovnání šesti a osmi vrstev výztuže:

- Nulová hypotéza: 6 a 8 vrstev výztuže nemá vliv na podíl pórů v kompozitu.
- Alternativní hypotéza: 6 a 8 vrstev výztuže má vliv na podíl pórů v kompozitu

V tabulce 4.16 jsou uvedeny výsledky hypotézy při teplotě 200 °C, v tabulce 4.17 pro teplotu 600 °C a v tabulce 4.18 pro teplotu 1100 °C. Porovnány jsou odděleně osnovy – příčná vlákna a útky – podélná vlákna.

Tab. 4.16 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro teplotu 200 °C

Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů				
teplota	200 °C			
Počet vrstev	6	8	6	8
Vzorek	7 o	8 o	7 ú	8 ú
Rozptyl	5E-05	6,67E-05	0,00003	3,29E-05
Pozorování	9	4	5	10
Společný rozptyl	5,45E-05		3,2E-05	
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0		0	
Rozdíl	11		13	
t Stat	-0,75107		0,548607	
P(T<=t) (1)	0,234188		0,296286	
t krit (1)	1,795885		1,770933	
P(T<=t) (2)	0,468376		0,592573	
t krit (2)	2,200985		2,160369	
Závěr	nemá vliv	t>0,05	nemá vliv	t>0,05

Tab. 4.17 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro teplotu 600 °C

Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů				
teplota	600 °C			
Počet vrstev	6	8	6	8
Vzorek	9 o	10 o	9 ú	10 ú
Rozptyl	2,38E-05	6,78E-05	1,04E-05	0,000337
Pozorování	7	10	11	6
Společný rozptyl	5,02E-05		0,000119	
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0		0	
Rozdíl	15		15	
t Stat	0,040918		-4,32097	
P(T<=t) (1)	0,48395		0,000303	
t krit (1)	1,75305		1,75305	
P(T<=t) (2)	0,967901		0,000606	
t krit (2)	2,13145		2,13145	
Závěr	nemá vliv	t>0,05	má vliv	t<0,05

Tab. 4.18 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro teplotu 1100 °C

Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů				
teplota	1100 °C			
Počet vrstev	6	8	6	8
Vzorek	11 o	12 o	11 ú	12 ú
Rozptyl	6,1E-06	2,38E-06	2,87E-06	1,44E-06
Pozorování	5876	6908	1263	14924

Tab. 4.18 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro teplotu 1100 °C

Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů				
teplota	1100 °C			
Společný rozptyl	4,09E-06		1,55E-06	
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0		0	
Rozdíl	12782		16185	
t Stat	25,10551		-1,37411	
P(T<=t) (1)	4,1E-136		0,084714	
t krit (1)	1,644973		1,644948	
P(T<=t) (2)	8,2E-136		0,169428	
t krit (2)	1,96015		1,960111	
Závěr	má vliv	t<0,05	nemá vliv	t>0,05

Výsledek testování: Z tabulky 4.16 bylo zjištěno, že při teplotě vytvrzení 200 °C nemá počet tkaninových výztuží v kompozitu vliv na podíl pórů. Při teplotě vytvrzení 600 °C viz tabulka 4.17, nemá počet výztuží vliv na podíl pórů pouze v osnově, podélných vláknech. Při teplotě 1100 °C se výsledky liší, proto bylo vhodné provést i test na shodu mediánů viz následující kapitola 4.7. Z tabulky 4.18 z položky pozorování je možné vyčíst, že počet pórů je výrazně vyšší v kompozitu s osmi vrstvami výztuže v útku, příčných vláknech.

4.7 Kruskal – Wallisův test (test shody mediánů)

Kruskal – Wallisův test se používá k ověření shody měř polohy (středních hodnot, resp. mediánů). V předchozí kapitole byl vliv počtu vrstev na podíl pórů testován dvouvýběrovým t -testem, kde se porovnávaly průměry dvou výběrů. Proto bylo vhodné otestovat i shodu mediánů.

Pro zjištění vlivu počtu vrstev na podíl pórů se nejprve stanoví nulová H_0 a alternativní hypotéza H_A .

H_0 : Mediány ploch pórů, z nichž pocházejí analyzované výběry, lze považovat za shodné.

H_A : Mediány ploch pórů, z nichž pocházejí analyzované výběry, nelze považovat za shodné.

Kruskal - Wallisův test pro teplotu vytvrzení 200 °C v osnově, příčných vláknech:

Testové kritérium: 0,48

p-hodnota: 0,4875

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 nezamítáme H_0 .

Kruskal - Wallisův test pro teplotu vytvrzení 200 °C v útku, podélných vláknech:

Testové kritérium: 0,24

p-hodnota: 0,6242

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 nezamítáme H_0 .

Kruskal - Wallisův test pro teplotu vytvrzení 600 °C v osnově, příčných vláknech:

Testové kritérium: 0,06

p-hodnota: 0,8073

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 nezamítáme H_0 .

Kruskal - Wallisův test pro teplotu vytvrzení 600 °C v útku, podélných vláknech:

Testové kritérium: 6,83

p-hodnota: 0,009

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 .

Kruskal - Wallisův test pro teplotu vytvrzení 1100 °C v osnově, příčných vláknech:

Testové kritérium: 174,93

p-hodnota: 0

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 .

Kruskal - Wallisův test pro teplotu vytvrzení 1100 °C v útku, podélných vláknech:

Testové kritérium: 1331,55

p-hodnota: 0

Závěr testování: Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 .

Z výše uvedeného testu bylo prokázáno, že při zvyšující se teplotě má počet vrstev vliv na plošný podíl pórů v kompozitu. Při teplotě 200 °C lze počet vrstev zanedbat. Při teplotě 600 °C byl spočítán vliv pouze v útku, podélných vláknech. Teplota 1100 °C má významný vliv na použití šesti nebo sedmi vrstev výztuže.

5. ZÁVĚR

V této práci byl porovnáván vliv vazby tkaninové výztuže, tlaku při výrobě, teploty při vytvrzení a počtu vrstev tkaninové výztuže na konečnou kvalitu kompozitu.

Diplomová práce ukázala, že nejvíce malých strukturních defektů (do $0,0001 \text{ mm}^2$) lze předpokládat u vazby atlasové a keprové, dále u kompozitů vytvrzených při teplotě 1100°C . Naopak nejméně pórů bylo zjištěno u kompozitů v plátňové vazbě při teplotě 200°C . Zde se, ale jednalo o velké póry od velikosti $0,01 \text{ mm}^2$. Toto zjištění je vhodné zejména pro účel použití kompozitů. Například pokud by bylo potřeba, aby kompozit plaval na vodě, je vhodné použít desku s větším podílem malých pórů atd.

Dále byl zkoumán vliv tlaku. Za tímto účelem byla použita analýza rozptylu a Leveneův test na variabilitu. Analýza rozptylu porovnává průměry výběrů, proto bylo vhodné zvolit i test na variabilitu, který prokázal vliv tlaku na strukturu kompozitu. Při analýze osnovy (příčných vláken) kompozitní desky s atlasovou vazbou nebyl zaznamenán vliv tlaku na strukturní defekty. Tato skutečnost vychází z principu tkaní, kdy jsou osnovní nitě více napnuté než útkové. Atlasová vazba je méně provázaná než keprová, proto vzduchové bubliny vzniklé při výrobě lépe „opouští“ vrstvy kompozitu.

Vazba, při dodržení dalších parametrů výroby kompozitu (tlak a teplota), má vliv na výslednou „dřavost“ kompozitu.

Kompozitní desky byly vytvrzeny při teplotách: 200°C , 600°C a 1100°C . Leveneův test prokázal významný vliv teploty na výsledné složení kompozitu. Při teplotě 200°C bylo naměřeno nejméně pórů. Teplota 1100°C způsobila destrukci kompozitu při přípravě vzorků.

Práce též ukázala, že při zvyšující se teplotě má počet vrstev výztuže vliv na strukturu kompozitu. K tomu byl využit Kruskal - Wallisův test shody mediánů, který vypočítal, že při teplotě 200°C lze počet vrstev zanedbat. Toto zjištění je výhodné zejména v případě, potřebujeme-li počet zvolit počet výztuže podle účelu použití. Teplota 1100°C má významný vliv na strukturu použití šesti nebo osmi vrstev výztuže.

Předložená práce volně navazuje na předchozí práce o kompozitech s tkaninovou anorganickou výztuží. Pokračováním této práce by mohlo být zkoumání struktury kompozitu při jiných parametrech výroby či vliv impregnace na podíl pórů.

Seznam obrázků

<i>Obr. 2. 1 Tahový diagram [4]</i>	12
<i>Obr. 2.2 Mokrý způsob výroby kompozitů [1]</i>	15
<i>Obr. 2.3 Technologie 1 [1]</i>	19
<i>Obr. 2.4 Technologie 2 [1]</i>	19
<i>Obr. 2. 5 Technologie 3 - nanesení prášku a jeho slinutí [1]</i>	20
<i>Obr. 2.6 Navíjení na principu soustruhu [5]</i>	21
<i>Obr. 2.7 Tažení profilů [5]</i>	23
<i>Obr. 2.8 Plátňová vazba [4]</i>	25
<i>Obr. 2.9 Keprová vazba [4]</i>	25
<i>Obr. 2.10 Atlasová vazba [4]</i>	26
<i>Obr. 2.11 Vliv jednotlivých procesů při výrobě skla na viskozitu skla [8]</i>	28
<i>Obr. 2.12 Změny struktury PAN vlákna [1]</i>	34
<i>Obr. 2.13 Bublinový pór v kompozitu[vlastní zdroj]</i>	41
<i>Obr. 2.14 Bublinový pór v kompozitu [vlastní zdroj]</i>	41
<i>Obr. 2.15 Trhliny v kompozitu [vlastní zdroj]</i>	42
<i>Obr. 3.1 Postup získání obrazu</i>	47
<i>Obr. 3.2 Bruska příčných řezů [14]</i>	49
<i>Obr. 3.3 Příčný nábrus a snímání [21]</i>	49
<i>Obr. 3.4 Vzorek 8 o (8 vrstev výztuže, 200°C vytvrzení, osnova – příčná vlákna)</i>	50
<i>Obr. 3 5 Vzorek 8 ú (8 vrstev výztuže, 200°C vytvrzení, útek -podélná vlákna)</i>	50
<i>Obr. 3 6 Ukázka prahování v softwaru NIS-elements</i>	51
<i>Obr. 3.7 Ukázka měření ploch pórů v softwaru NIS-elements</i>	52
<i>Obr. 4.1 Fibrogram</i>	54
<i>Obr. 4.2 Histogram</i>	56
<i>Obr. 4. 3 Grafické zhodnocení velikosti pórů u všech vzorků</i>	63
<i>Obr. 4.4 Grafické zhodnocení závislosti tlaku na podíl pórů</i>	64
<i>Obr. 4.5 Grafické zhodnocení závislosti tlaku na podíl pórů – jiné měřítko</i>	65
<i>Obr. 4. 6 Grafické zhodnocení vlivu teploty na pórovitost</i>	67

Seznam tabulek

<i>Tab. 2.1 Hodnoty fyzikálních vlastností čedičových a skleněných vláken [12].....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 2.2 Hodnoty chemických vlastností čedičových a skleněných vláken [12]</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 2.3 Hodnoty tepelných vlastností čedičových a skleněných vláken [12].....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 2.4 Posloupnost strukturních úrovní [13]</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 3.1 Vzorky použitých kompozit.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 3.2 Vlastnosti LUKOSIL M 130 .[20].....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 3.3 Parametry broušení.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 4.1 Výsledky měření kompozitu s tkaninovou výztuží</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 4.2 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 4.3 Statistické vyhodnocení naměřených dat u kompozit s tkaninovou výztuží.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 4.4 Rozdělení naměřených ploch bublin do intervalů četností.....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 4.5 Plošný podíl pórů v kompozitu s tkaninovou výztuží.....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 4.6 Plochy pórů v kompozitu.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 4.7 Hodnoty pórovitosti při různém tlaku použité při výrobě kompozitu.....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 4.8 Hodnoty pórovitosti při různé teplotě použité při výrobě kompozitu.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 4.9 Výsledky testu Anova: jeden faktor v programu Excel pro kompozit s tkaninovou výztuží v atlasové vazbě v osnově, příčných vláknech.....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 4.10 Výsledky testu Anova: jeden faktor v programu Excel pro kompozit s tkaninovou výztuží v atlasové vazbě v útku, podélných vláknech.....</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 4.11 Výsledky testu Anova: jeden faktor v programu Excel pro kompozit s tkaninovou výztuží v keprové vazbě v osnově, příčných vláknech.....</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 4.12 Výsledky testu Anova: jeden faktor v programu Excel pro kompozit s tkaninovou výztuží v keprové vazbě v útku, podélných vláknech.....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 4.13 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro tlak 1,4 MPa.....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 4.14 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro tlak 3 MPa.....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 4.15 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro tlak 5,9 MPa.....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 4.16 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro teplotu 200 °C.....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 4.17 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro teplotu 600 °C.....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 4.18 Výsledky testování hypotéz v programu Excel pro teplotu 1100 °C.....</i>	<i>79</i>

Použitá literatura:

- [1] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Vlákna pro kompozity* [online]. [cit. 2013-04-13]. pdf. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkornek/vlakna.pdf>
- [2] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály: druhy a jejich užití*. Technická univerzita v Liberci, 2007.
- [3] *KOMPOZITNÍ MATERIÁLY*. ČVÚT v Praze, s. 53 [cit. 2014-12-24]. pdf. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf>
- [4] GURIT.COM. Guide to composites: Delivering the future of composite solutions. *Guide to composites* [online]. 2011, č. 1, s. 73 [cit. 2014-12-24]. Dostupné z: <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>
- [5] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [6] GRIES, Thomas. *Mitteilungen*. Institut für Textiltechnik: RWTH Aachen, 2004. 51 s. Dostupné z: <http://hsozkult.geschichte.hu-berlin.de/zeitschriften/ausgabe=2217>
- [7] Institut geologického inženýrství Hornicko-geologická fakulta [online]. 2014 [cit. 2014-01 -02]. *Sklo*. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html>
- [8] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. 2. uprav.vyd. Praha: SNTL, 1981, 516 s.
- [9] REJMANOVÁ, Lenka.: *Využití odpadů krátkých čedičových vláken pro kompozitní materiály*. Liberec: Diplomová práce, 2009. 79 s.
- [10] PTÁČKOVÁ, Katarína.: *Geometrické parametry kontinuálních čedičových vláken*. Liberec: Diplomová práce, 2007. 68 s.
- [11] MENŠÍKOVÁ, Pavla.: *Chemická odolnost skleněných a čedičových vláken*. Liberec: Diplomová práce, 2008. 61 s
- [12] Skripta.ft.tul.cz [online]. 2009 [cit. 2013-04-30]. *Textilní kompozity*. Dostupné z: https://skripta.ft.tul.cz/database/list_aut.cgi?aut=32&skr=44&pro=.

- [13] SALAČOVÁ, Jana.: *Možnosti počítačového vidění reálné struktury tkaninových kompozit*, DisP, TU Liberec, 2003
- [14] KADERÁBEK, Lukáš.: *Vnitřní struktura kompozit s anorganickou výztuží*. Liberec: Diplomová práce, 2008
- [15] JORTNER, Julius. *Microstructure of cloth-reinforced carbon-carbon laminates*. Great Britain: Carbon 24, 1992. ISSN 0008-6223/92.
- [16] JORTNER, Julius. *Macroporosity and interface cracking in multi-directional carbon-carbons*. Great Britain: Carbon 24, 1986. ISSN 0008-6223/86.
- [17] GAO, Fengge, John W. PATRICK a Alan WALKER. *The characterisation of cracks and voids in two-dimensional carbon-carbon composites*. Great Britain: Carbon 31, 1993. ISSN 0008- 6223/93.
- [18] SVOBODA, Miroslav. *Analýza obrazu počítačem*. Praha: Medsoft, 1989.
- [19] NIS-Elements: Uživatelská příručka – verze 3.0 Laboratoř paging s.r.o., 2008.
- [20] LUKOSIL: silikonové laky. *Lučební závody a.s. Kolín* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.pzservis.cz/izol_projektanti2/lucebni/lukosilx.htm
- [21] SALACOVA, Jana. *Gui for Voids Segmentation*. Prague: Technical Computing, 2006. ISBN 80-7080-616-8.
- [22] HANOUSEK, J. *Moderní metody zpracování dat - matematická statistika pro každého*. 1. vyd. Praha: Grada, 1992, 216 s. ISBN 80-856-2331-5.
- [23] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Statistická analýza experimentálních dat*. Vyd. 2. uprav. rozš. Praha: ACADEMIA, 2004, 953 s. ISBN 80-200-1254-0.

Příloha

Tab. 1: Vzorky použitých kompozitů

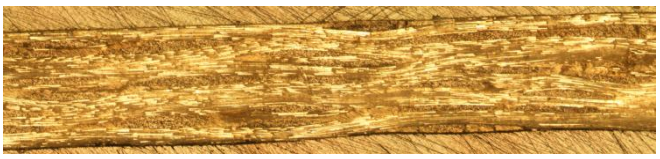
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží				
Číslo vzorku	struktura	Složení (počet vrstev výztuže)	Teplota vytvrzení [°C]	Tlak při lisování [MPa]
1	Atlas 3/1	6	200	1,4
2	Atlas 3/1	6	200	3
3	Atlas 3/1	6	200	5,9
4	Kepr 2/2	6	200	1,4
5	Kepr 2/2	6	200	3
6	Kepr 2/2	6	200	5,9
7	Plátno	6	200	$1,4 \cdot 10^{-2}$
8	Plátno	8	200	$1,4 \cdot 10^{-2}$
9	Plátno	6	600	$1,4 \cdot 10^{-2}$
10	Plátno	8	600	$1,4 \cdot 10^{-2}$
11	Plátno	6	1100	$1,4 \cdot 10^{-2}$
12	Plátno	8	1100	$1,4 \cdot 10^{-2}$

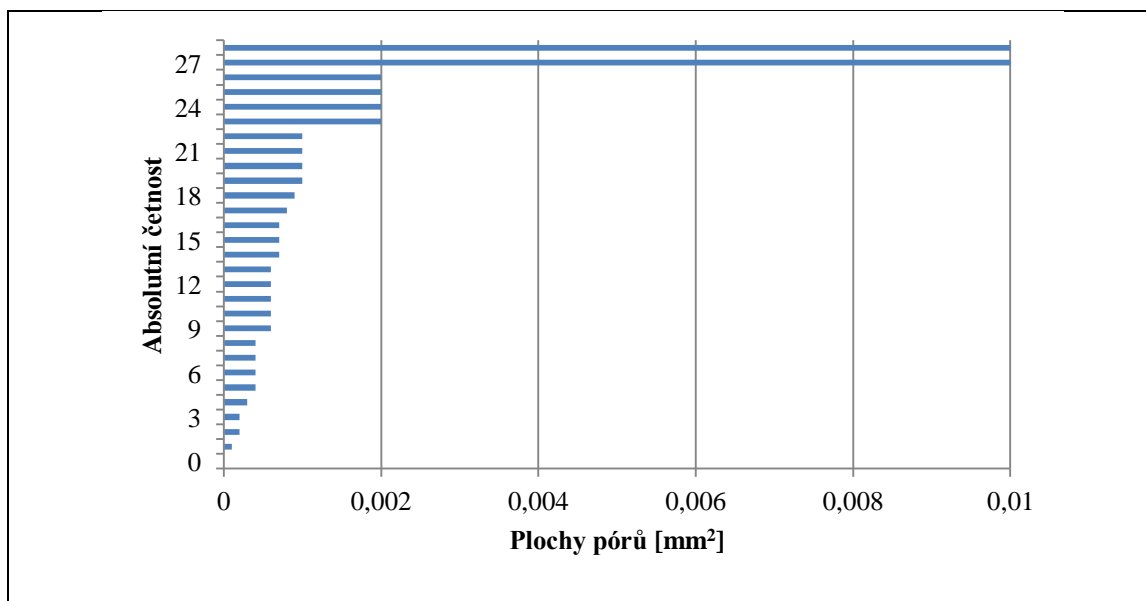
Z každého vzorku byl vytvořen jak příčný, tak podélný řez. Celkem tedy bylo 24 vzorků. Proto dále bude značení například: **1o** tzn. 1 osnova a **1ú** tzn. 1 útek.

Všechna naměřená data jsou postupně uvedena v tabulkách 2 až 47. První vzorek již byl zpracován, proto je vyřazen z přílohy.

Fibrogram vždy popisuje na ose x plochy pórů v kompozitu [mm²] a na ose y absolutní četnost. Histogram uvádí na ose x plochy pórů v kompozitu [mm²] a osa y relativní četnost [%].

Tab. 2 Výsledky měření vzorku číslo 1ú

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží			
Vzorek	1ú		
Počet vrstev výztuže	6		
Teplota vytvrzení	250		
Vazba výztuže	A 3/1		
Tlak při lisování [MPa]	1,4		
Snímání	Útek – podélná vlákna		
Rastrový obraz			
Naměřená data	0,0001	0,0006	
	0,0002	0,0006	0,001
	0,0002	0,0006	0,001
	0,0003	0,0007	0,002
	0,0004	0,0007	0,002
	0,0004	0,0007	0,002
	0,0004	0,0008	0,002
	0,0004	0,0009	0,01
	0,0006	0,001	0,01
	0,0006	0,001	

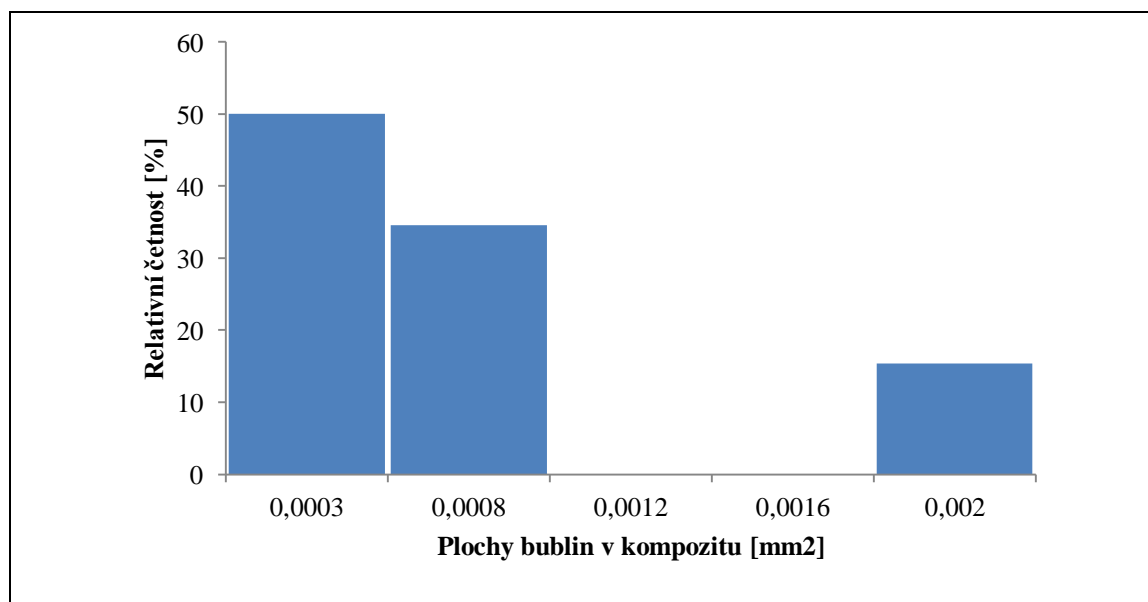


Obr. 1 Fibrogram vzorku 1ú

Z fibrogramu byla zjištěna tato vybočující měření 0,01, proto byla vyloučena z dalšího zpracování.

Tab. 3 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

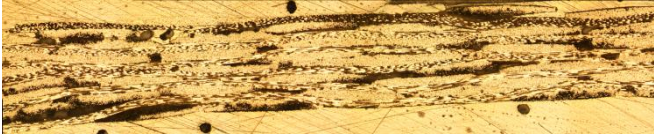
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,0001 - 0,0006	0,0003	13	50
2	0,0006 - 0,0010	0,0008	9	35
3	0,0010 - 0,0014	0,0012	0	0
4	0,0014 - 0,0018	0,0016	0	0
5	0,0018 - 0,0022	0,0020	4	15
Σ			26	100

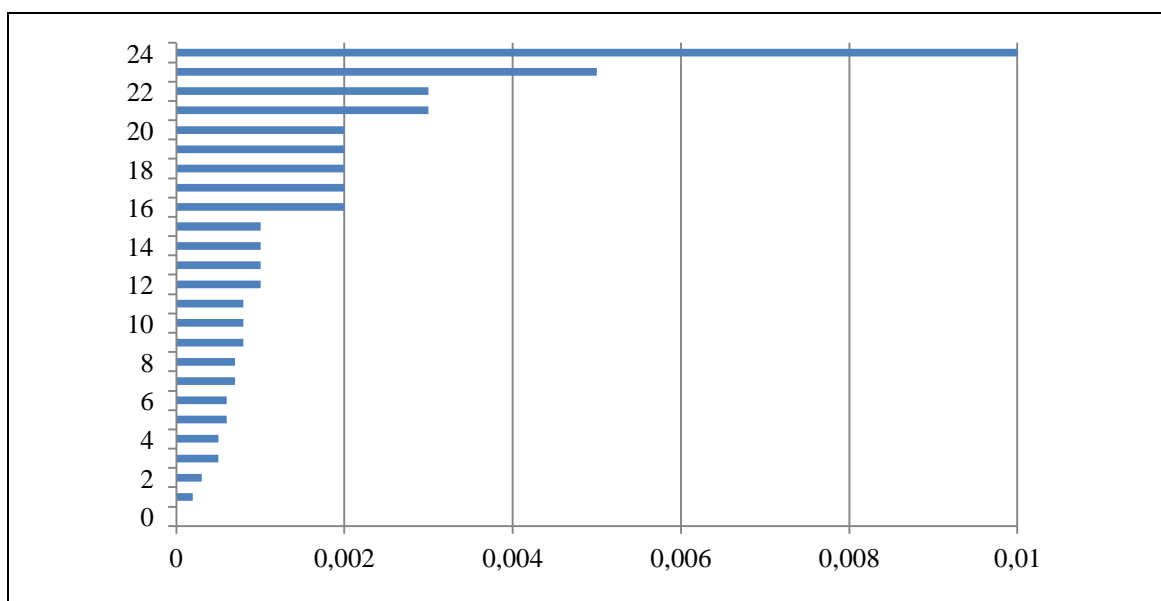


Obr. 2 Histogram vzorku 1ú

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 4 Výsledky měření vzorku číslo 2o

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží				
Vzorek	2o			
Počet vrstev výztuže	6			
Teplota vytvrzení	250			
Vazba výztuže	A 3/1			
Tlak při lisování [MPa]	3			
Snímání	Osnova – příčná vlákna			
Rastrový obraz				
Naměřená data	0,0002	0,0008		
	0,0003	0,001		
	0,0005	0,001		
	0,0005	0,001	0,003	
	0,0006	0,001	0,003	
	0,0006	0,002	0,005	
	0,0007	0,002	0,01	
	0,0007	0,002		
	0,0008	0,002		
	0,0008	0,002		

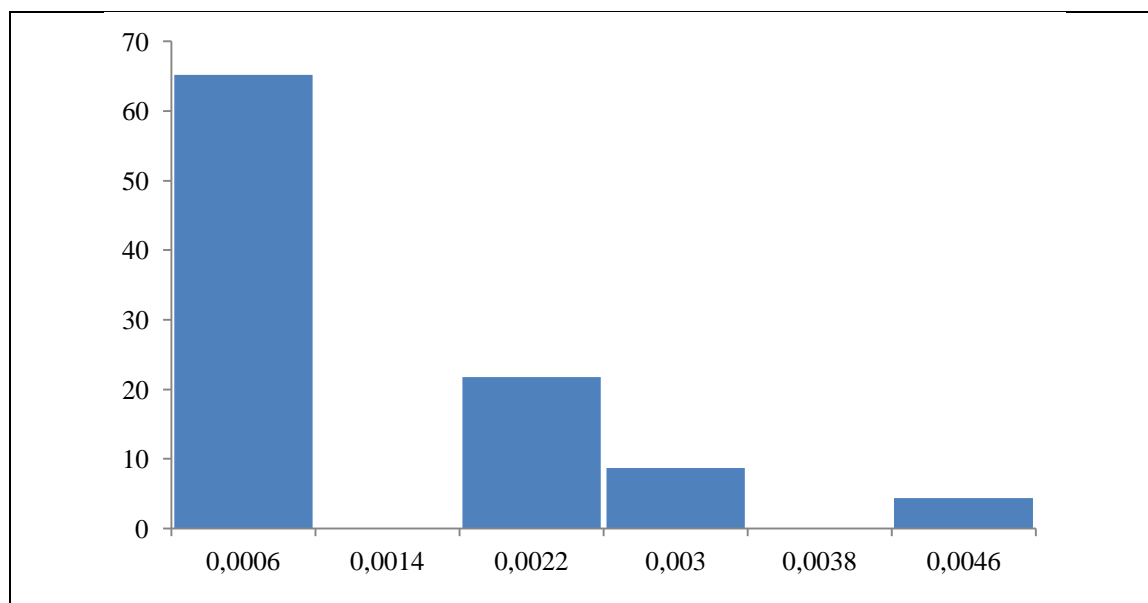


Obr. 3 Fibrogram vzorku 2o

Z fibrogramu bylo zjištěno toto vybočující měření 0,01, proto byla vyloučena z dalšího zpracování.

Tab. 5 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

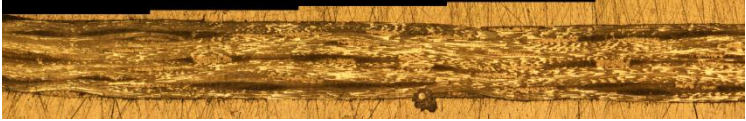
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	$S_{jd}-S_{jh}$ [mm]	S_j [mm]	n_j	$f_j = n_j/n*100$ [%]
1	0,0002 – 0,0010	0,006	15	65
2	0,0010 - 0,0018	0,0014	0	0
3	0,0018 - 0,0026	0,0022	5	22
4	0,0026 - 0,0034	0,003	2	9
5	0,0034 - 0,0042	0,0038	0	0
6	0,0042 - 0,0050	0,0046	1	4
Σ			23	100

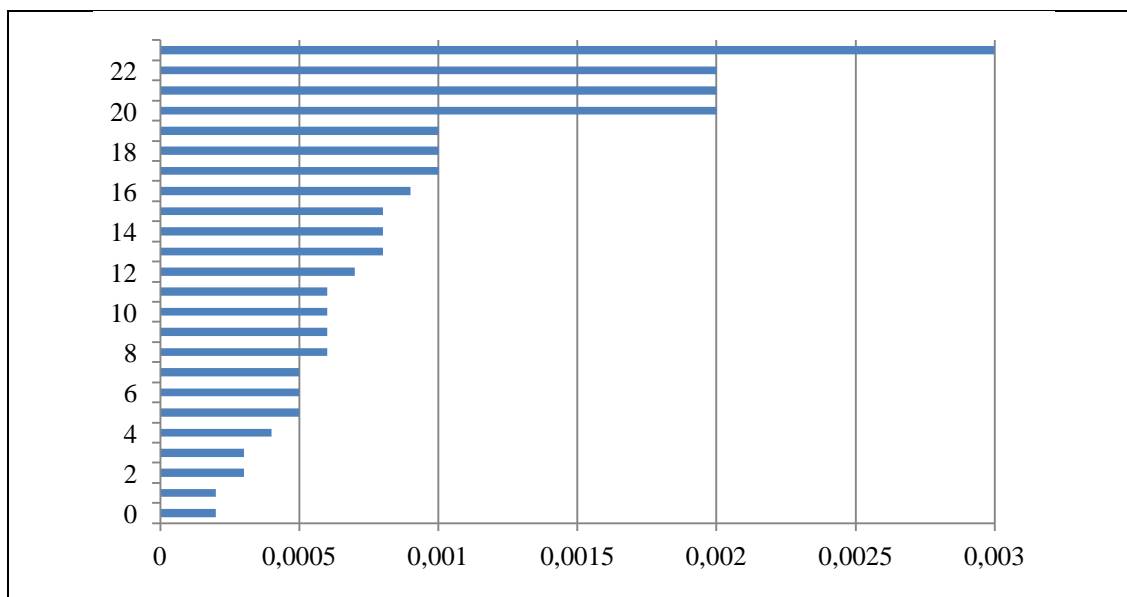


Obr. 4 Histogram vzorku 2o

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 6 Výsledky měření vzorku číslo 2ú

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží		
Vzorek	2ú	
Počet vrstev výztuže	6	
Teplota vytvrzení	250	
Vazba výztuže	A 3/1	
Tlak při lisování [MPa]	3	
Snímání	Útek – podélná vlákna	
Rastrový obraz		
Naměřená data	0,0002	0,0006
	0,0002	0,0007
	0,0003	0,0008
	0,0003	0,0008
	0,0004	0,0008
	0,0005	0,0009
	0,0005	0,001
	0,0005	0,001
	0,0006	0,001
	0,0006	0,002
	0,0006	0,002
	0,0006	0,003

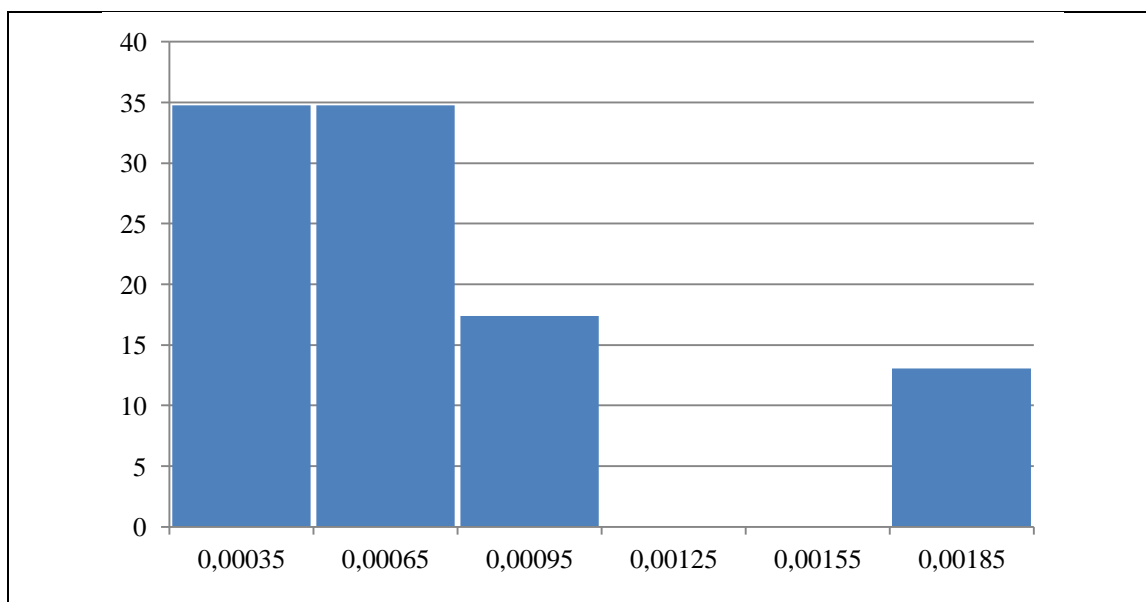


Obr. 5 Fibrogram vzorku 2ú

Z fibrogramu bylo zjištěno toto vybočující měření 0,003.

Tab. 7 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti


číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,0002 - 0,0005	0,00035	8	35
2	0,0005 - 0,0008	0,00065	8	35
3	0,0008 - 0,0011	0,00095	4	17
4	0,0011 - 0,0014	0,00125	0	0
5	0,0014 - 0,0017	0,00155	0	0
6	0,0017 - 0,002	0,00185	3	13
Σ			23	100

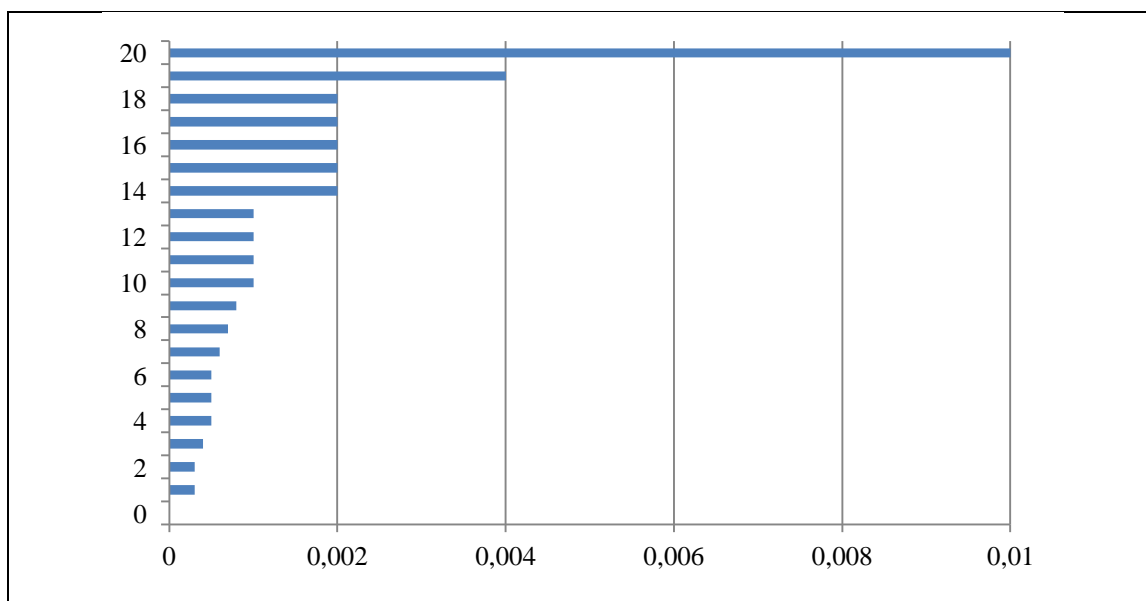


Obr. 6 Histogram vzorku 2ú

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 8 Výsledky měření vzorku číslo 3o

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží		
Vzorek	3o	
Počet vrstev výztuže	6	
Teplota vytvrzení	250	
Vazba výztuže	A 3/1	
Tlak při lisování [MPa]	5,9	
Snímání	Osnova – příčná vlákna	
Rastrový obraz		
Naměřená data	0,0003	0,001
	0,0003	0,001
	0,0004	0,001
	0,0005	0,002
	0,0005	0,002
	0,0005	0,002
	0,0006	0,002
	0,0007	0,002
	0,0008	0,004
	0,001	0,01

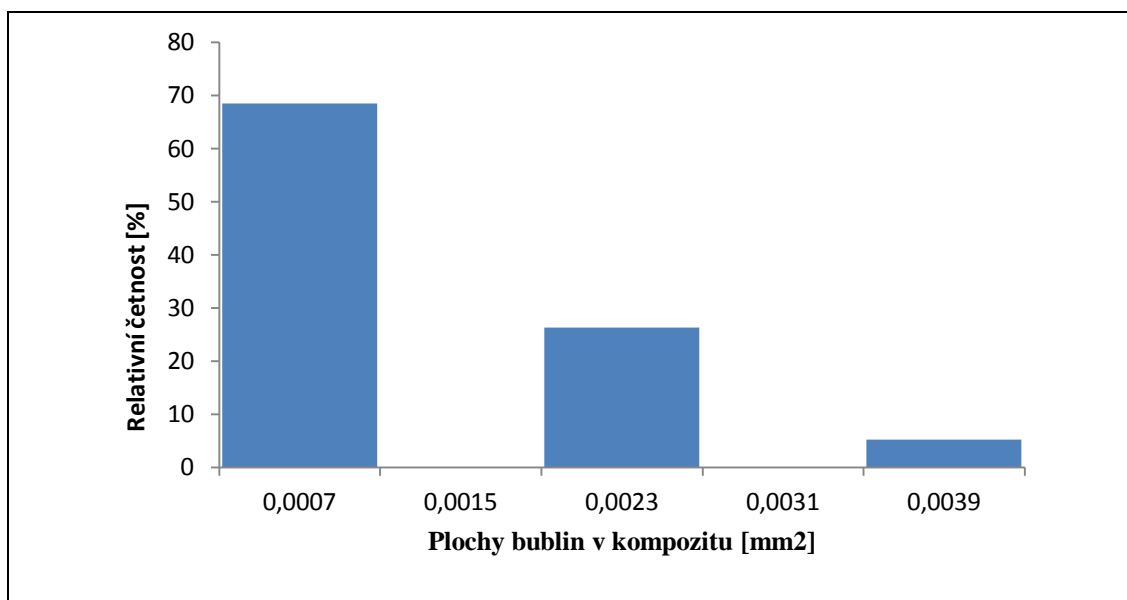


Obr. 7 Fibrogram vzorku 3o

Z fibrogramu bylo zjištěno vybočující měření 0,01, proto bylo vyloučeno z dalšího zpracování.

Tab. 9 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti


číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	$f_j = n_j/n \cdot 100$ [%]
1	0,0003 - 0,0011	0,0007	13	68
2	0,0011 - 0,0019	0,0015	0	0
3	0,0019 - 0,0027	0,0023	5	26
4	0,0027 - 0,0035	0,0031	0	0
5	0,0035 - 0,0043	0,0039	1	5
Σ			19	100

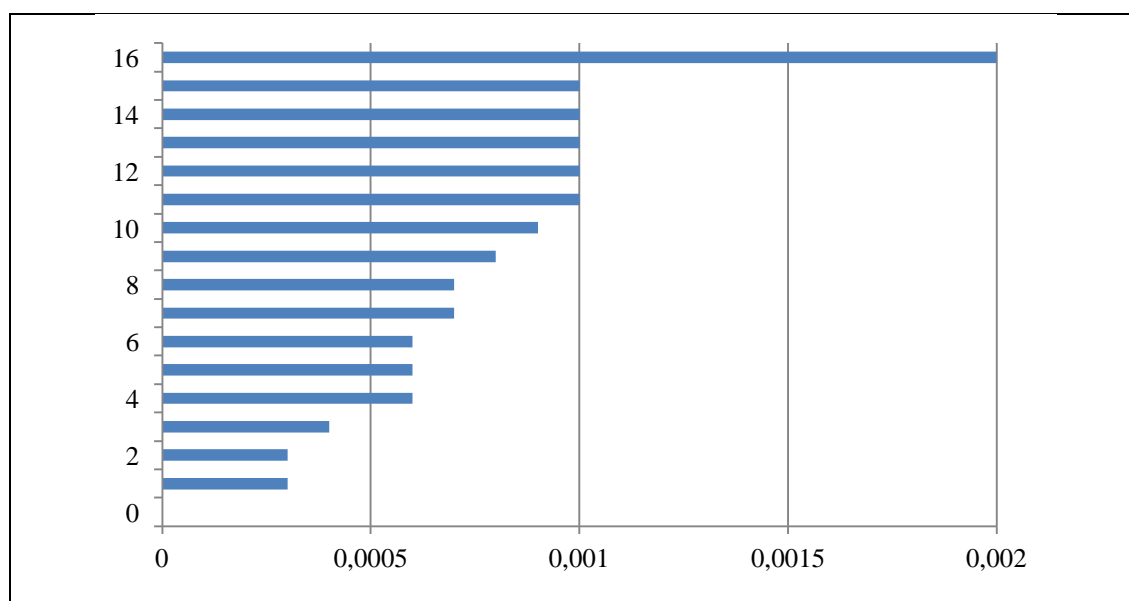


Obr. 8 Histogram vzorku 3o

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 10 Výsledky měření vzorku číslo 3ú

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží		
Vzorek	3ú	
Počet vrstev výztuže	6	
Teplota vytvrzení	250	
Vazba výztuže	A 3/1	
Tlak při lisování [MPa]	5,9	
Snímání	Útek – podélná vlákna	
Rastrový obraz		
Naměřená data	0,0003	0,001
	0,0003	0,001
	0,0004	0,001
	0,0006	0,001
	0,0006	0,001
	0,0006	0,002
	0,0007	
	0,0007	
	0,0008	
	0,0009	

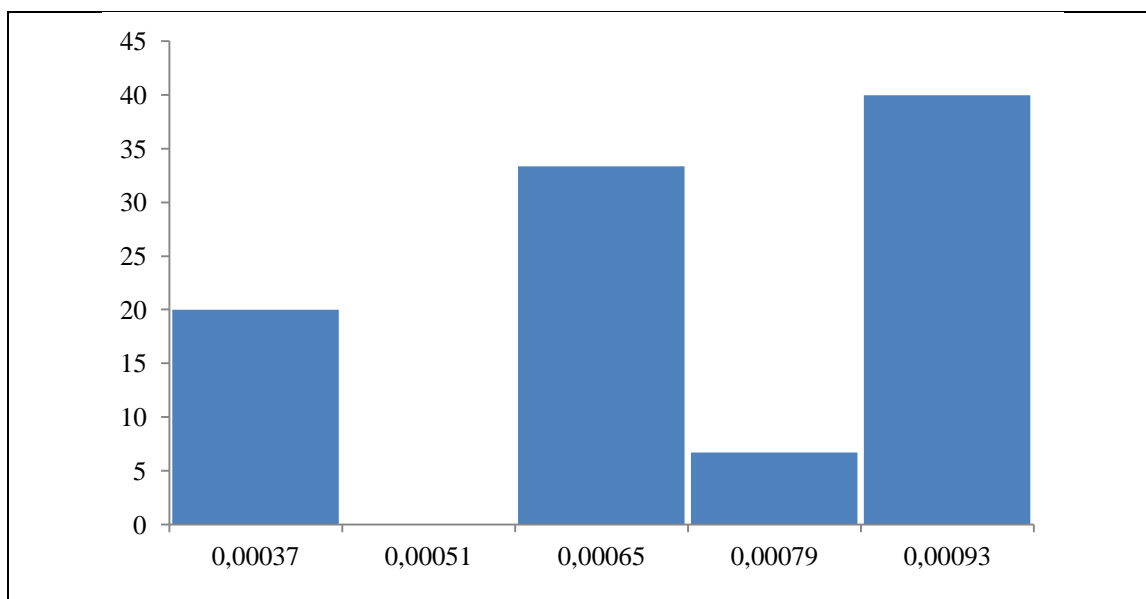


Obr. 9 Fibrogram vzorku 3ú

Z fibrogramu bylo zjištěno vybočující měření 0,002, proto bylo vyloučeno z dalšího zpracování.

Tab. 11 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

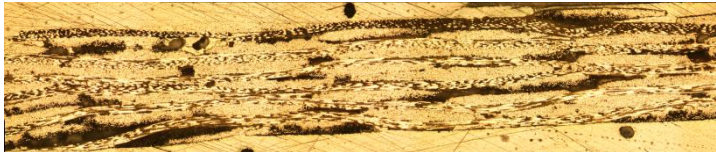
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,00030 - 0,00044	0,00037	3	20
2	0,00044 - 0,00058	0,00051	0	0
3	0,00058 - 0,00072	0,00065	5	33
4	0,00072 - 0,00086	0,00079	1	7
5	0,00086 - 0,00100	0,00093	6	40
Σ			19	100

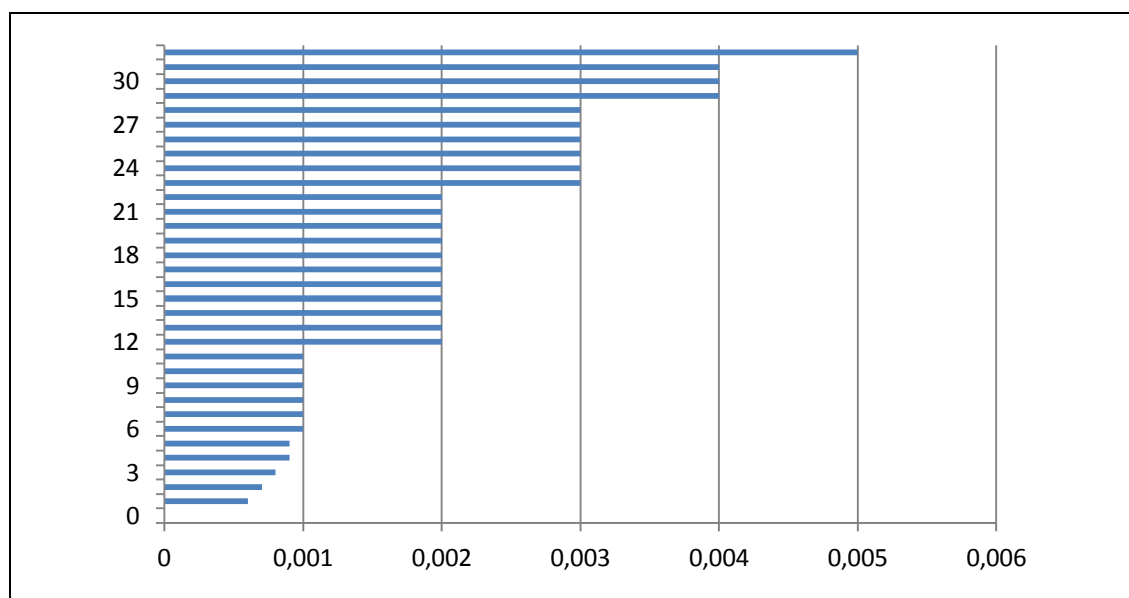


Obr. 10 Histogram vzorku 3ú

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 12 Výsledky měření vzorku číslo 4o

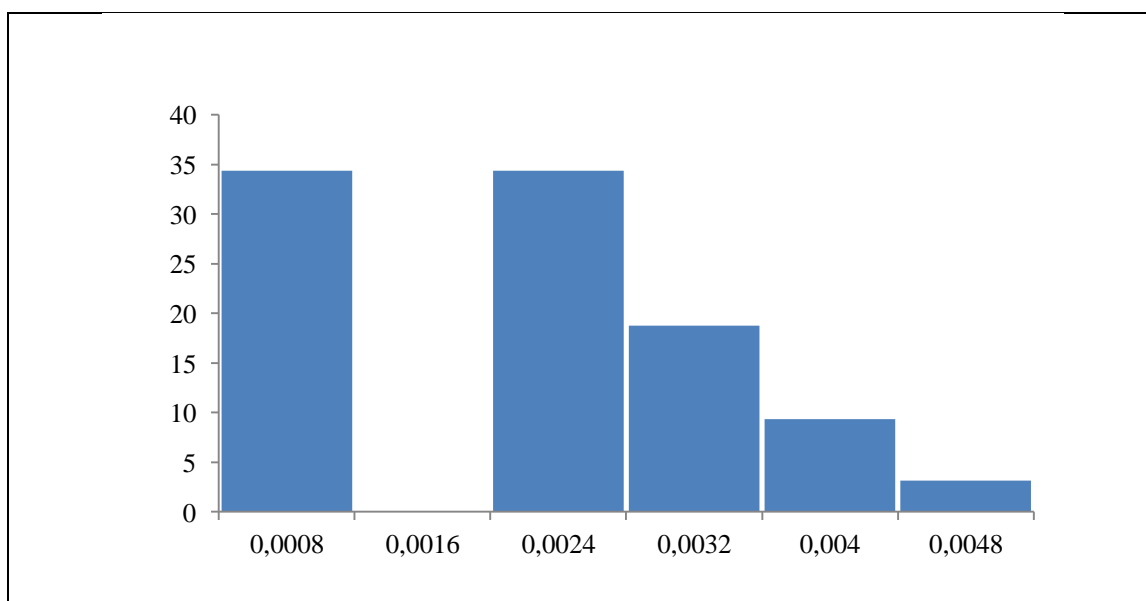
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží				
Vzorek	4o			
Počet vrstev výztuže	6			
Teplota vytvrzení	250			
Vazba výztuže	K 2/2			
Tlak při lisování [MPa]	1,4			
Snímání	Osnova – příčná vlákna			
Rastrový obraz				
Naměřená data				
	0,0006	0,001	0,002	
	0,0007	0,002	0,002	
	0,0008	0,002	0,003	
	0,0009	0,002	0,003	0,004
	0,0009	0,002	0,003	0,005
	0,001	0,002	0,003	
	0,001	0,002	0,003	
	0,001	0,002	0,003	
	0,001	0,002	0,004	
	0,001	0,002	0,004	



Obr. 11 Fibrogram vzorku 4o

Tab. 13 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti


číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,0006 - 0,0010	0,0008	11	34
2	0,0010 - 0,0018	0,0016	0	0
3	0,0018 - 0,0026	0,0024	11	34
4	0,0026 - 0,0034	0,0032	6	19
5	0,0034 - 0,0042	0,004	3	9
6	0,0042 - 0,005	0,0048	1	3
Σ			32	100

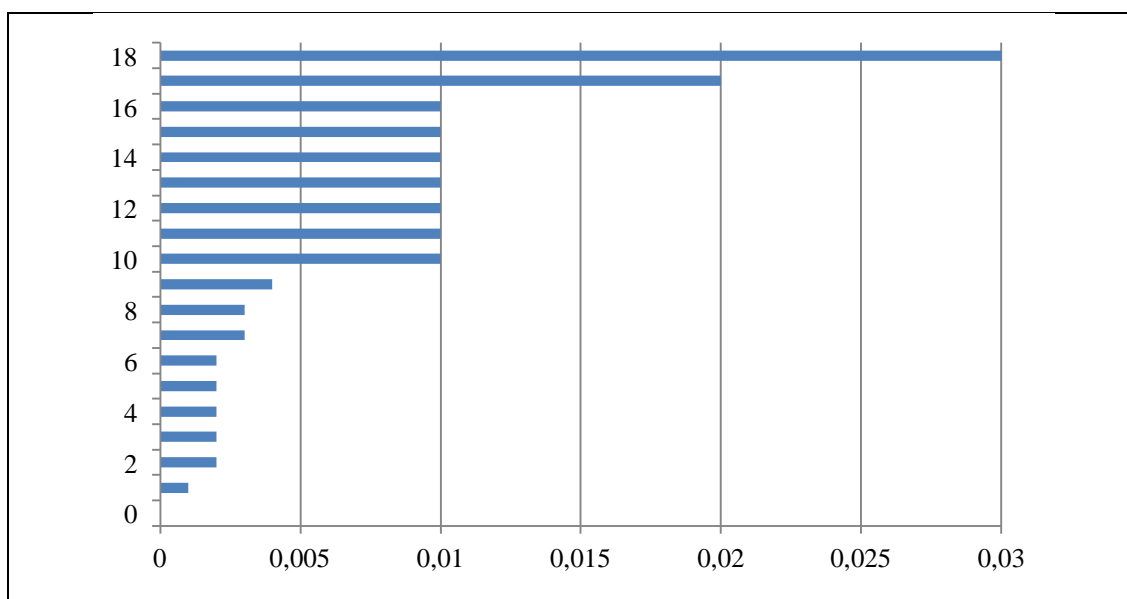


Obr. 12 Histogram vzorku 4o

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 14 Výsledky měření vzorku číslo 4ú

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží		
Vzorek	4ú	
Počet vrstev výztuže	6	
Teplota vytvrzení	250	
Vazba výztuže	K 2/2	
Tlak při lisování [MPa]	1,4	
Snímání	Útek – podélná vlákna	
Rastrový obraz		
Naměřená data	0,001	
	0,002	0,01
	0,002	0,01
	0,002	0,01
	0,002	0,01
	0,002	0,01
	0,003	0,01
	0,003	0,02
	0,004	0,03
	0,01	

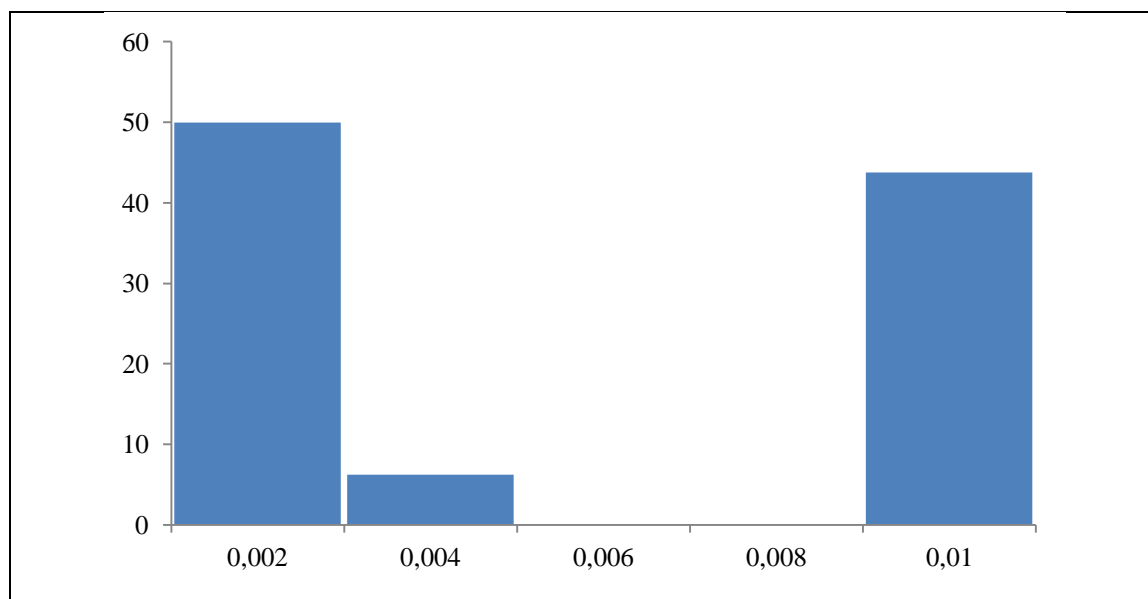


Obr. 13 Fibrogram vzorku 4ú

Z fibrogramu byla zjištěna vybočující měření 0,02 a 0,03, proto byla vyloučena z dalšího zpracování.

Tab. 15 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

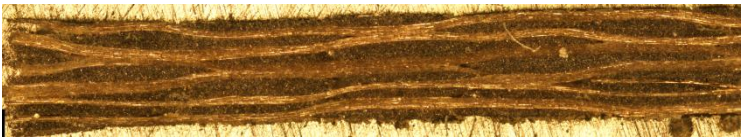
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	$f_j = n_j/n \cdot 100$ [%]
1	0,001 - 0,003	0,002	8	50
2	0,003 - 0,005	0,004	1	6
3	0,005 - 0,007	0,006	0	0
4	0,007 - 0,009	0,008	0	0
5	0,009 - 0,010	0,010	7	44
Σ			16	100

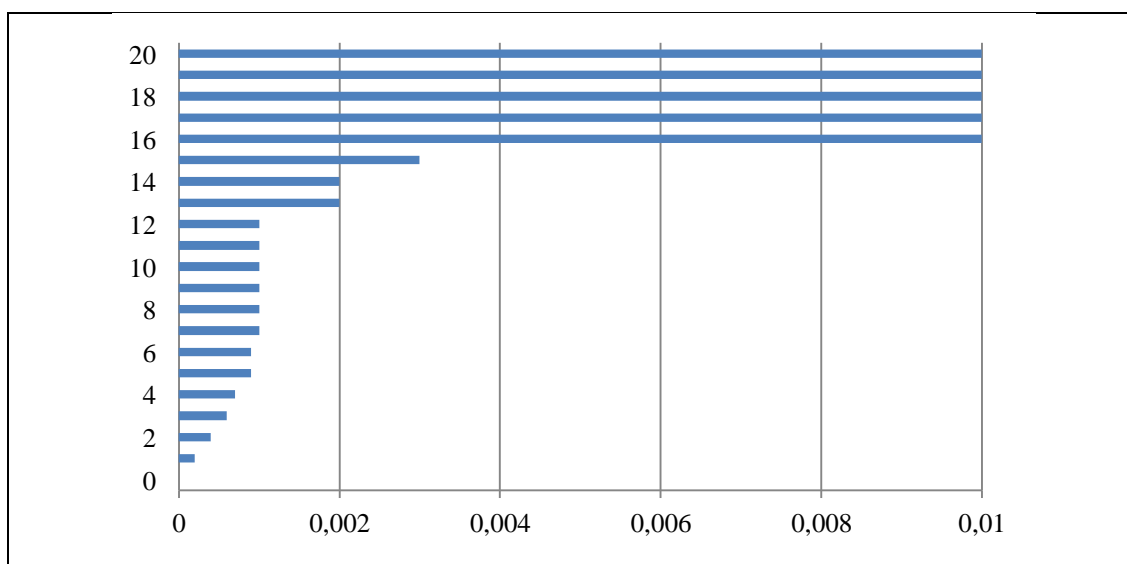


Obr. 14 Histogram vzorku 4ú

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 16 Výsledky měření vzorku číslo 5o

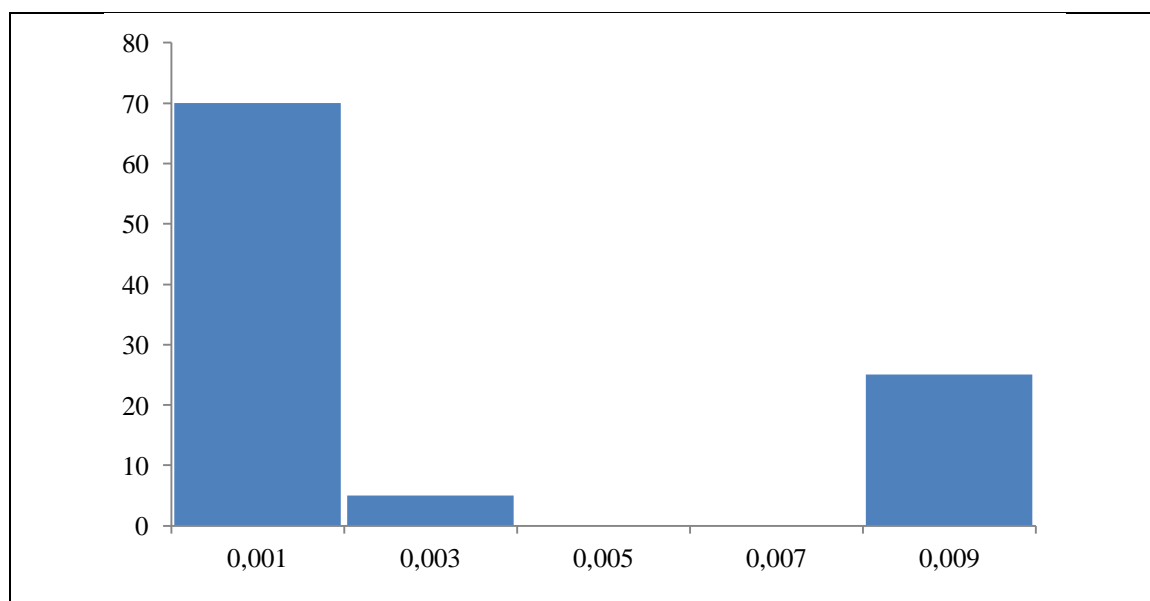
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží		
Vzorek	5o	
Počet vrstev výztuže	6	
Teplota vytvrzení	250	
Vazba výztuže	K 2/2	
Tlak při lisování [MPa]	3	
Snímání	Osnova – příčná vlákna	
Rastrový obraz		
Naměřená data	0,0002	0,001
	0,0004	0,001
	0,0006	0,002
	0,0007	0,002
	0,0009	0,003
	0,0009	0,01
	0,001	0,01
	0,001	0,01
	0,001	0,01
	0,001	0,01



Obr. 15 Fibrogram vzorku 5o

Tab. 17 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti


číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	$f_j = n_j/n \cdot 100$ [%]
1	0,0002 - 0,002	0,001	14	70
2	0,002 - 0,004	0,003	1	5
3	0,004 - 0,006	0,005	0	0
4	0,006 - 0,008	0,007	0	0
5	0,008 - 0,01	0,009	5	25
Σ			20	100

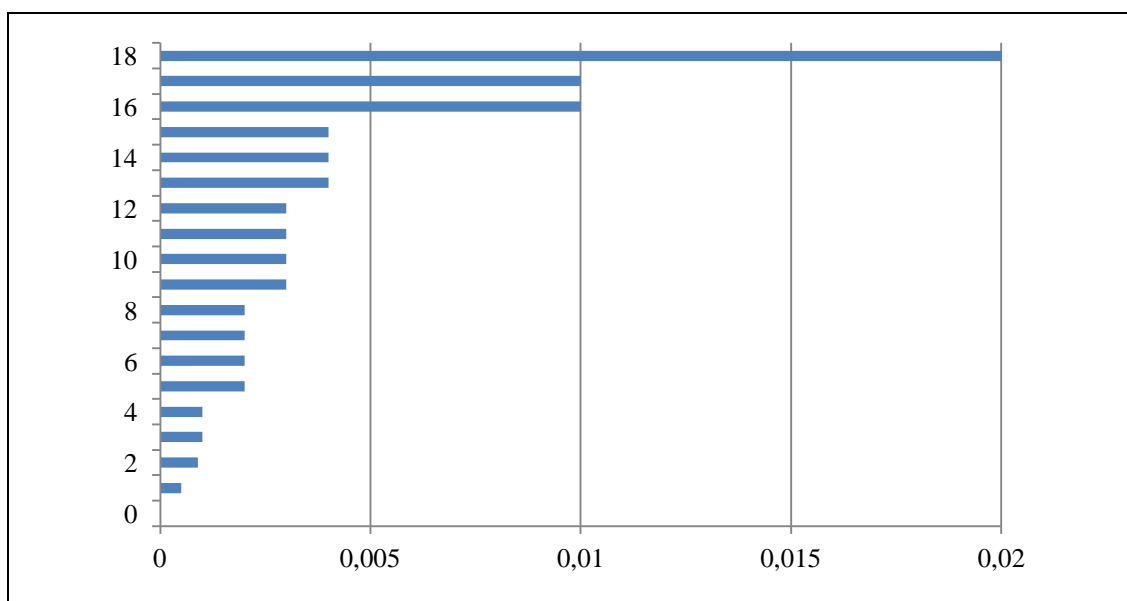


Obr. 16 Histogram vzorku 5o

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 18 Výsledky měření vzorku číslo 5ú

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží		
Vzorek	5ú	
Počet vrstev výztuže	6	
Teplota vytvrzení	250	
Vazba výztuže	K 2/2	
Tlak při lisování [MPa]	3	
Snímání	Útek – podélná vlákna	
Rastrový obraz		
Naměřená data	0,0005	0,003
	0,0009	0,003
	0,001	0,004
	0,001	0,004
	0,002	0,004
	0,002	0,01
	0,002	0,01
	0,002	0,02
	0,003	
	0,003	

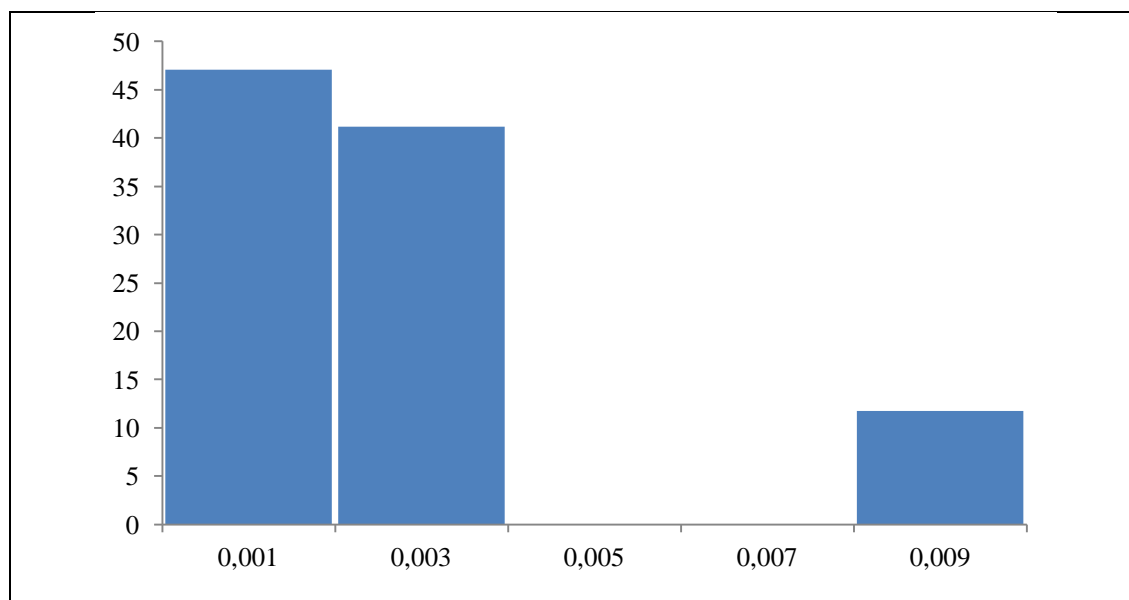


Obr. 17 Fibrogram vzorku 5ú

Z fibrogramu bylo zjištěno vybočující měření 0,02, proto bylo vyloučeno z dalšího zpracování.

Tab. 19 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti


číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,0002 - 0,002	0,001	8	47
2	0,002 - 0,004	0,003	7	41
3	0,004 - 0,006	0,005	0	0
4	0,006 - 0,008	0,007	0	0
5	0,008 - 0,01	0,009	2	12
Σ			17	100

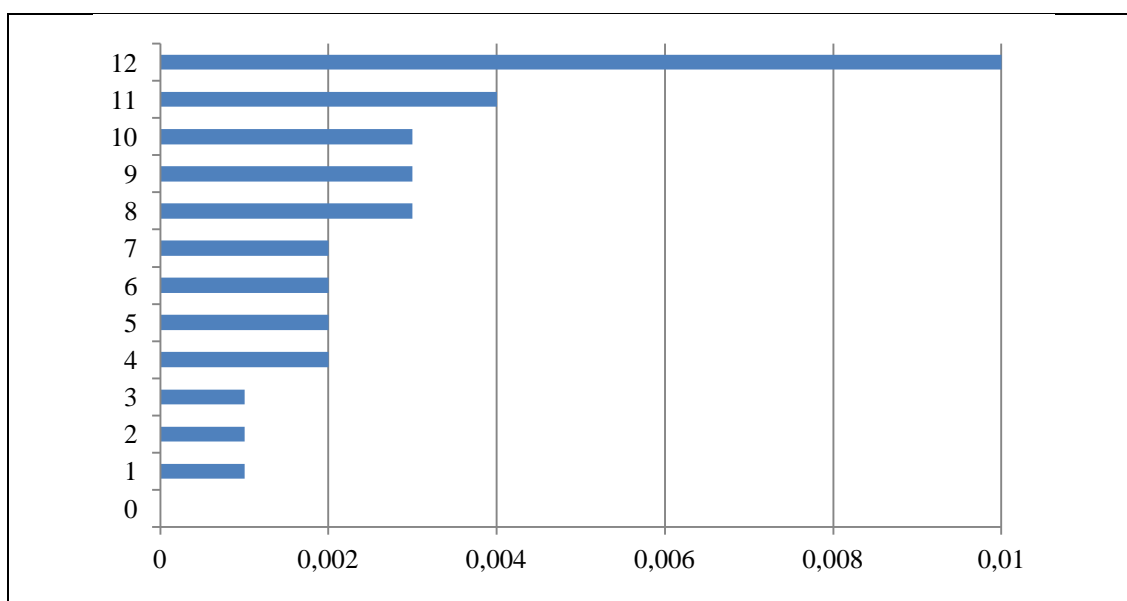


Obr. 18 Histogram vzorku 5ú

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 20 Výsledky měření vzorku číslo 60

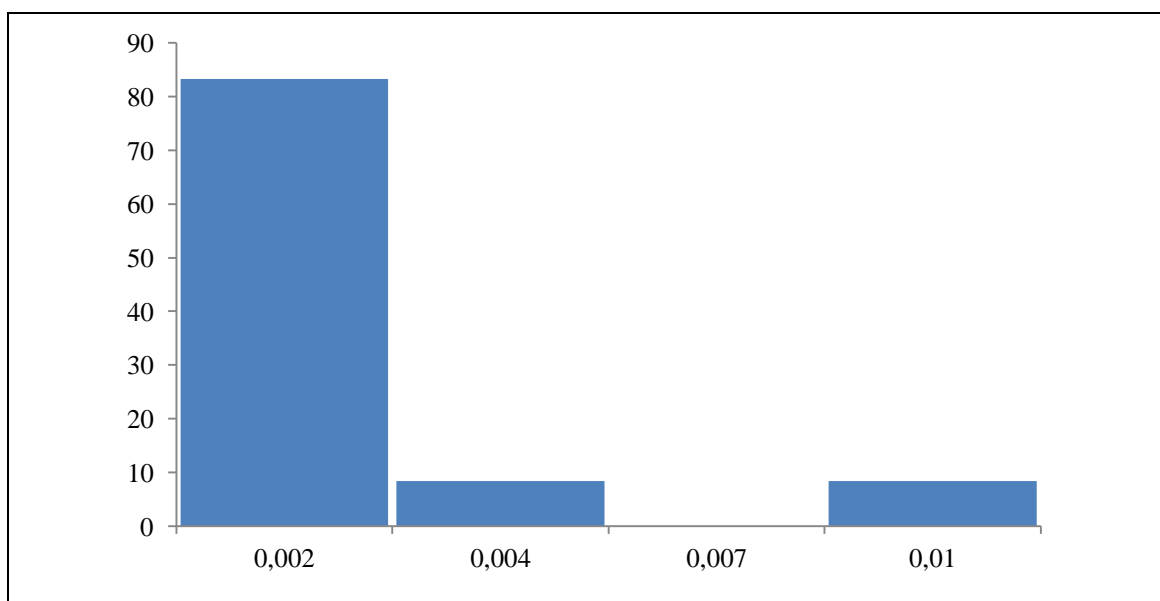
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží		
Vzorek	6o	
Počet vrstev výztuže	6	
Teplota vytvrzení	250	
Vazba výztuže	K 2/2	
Tlak při lisování [MPa]	5,9	
Snímání	Osnova – příčná vlákna	
Rastrový obraz		
Naměřená data	0,001	0,002
	0,001	0,003
	0,001	0,003
	0,002	0,003
	0,002	0,004
	0,002	0,01



Obr. 19 Fibrogram vzorku 60

Tab. 21 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

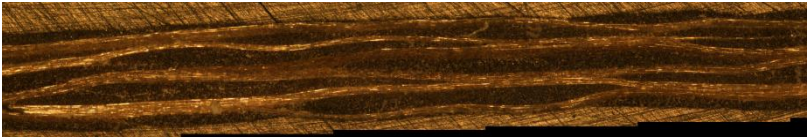
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,001 - 0,003	0,002	10	83
2	0,003 - 0,006	0,004	1	8
3	0,006 - 0,009	0,007	0	0
4	0,009 - 0,012	0,01	1	8
Σ			12	100

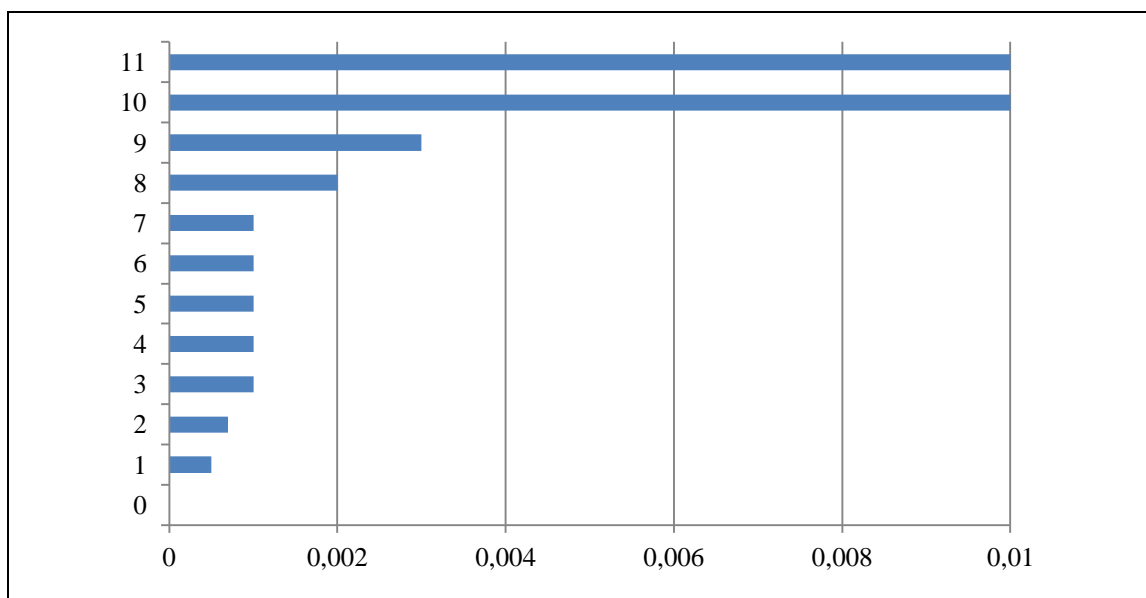


Obr. 20 Histogram vzorku 6o

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 22 Výsledky měření vzorku číslo 6u

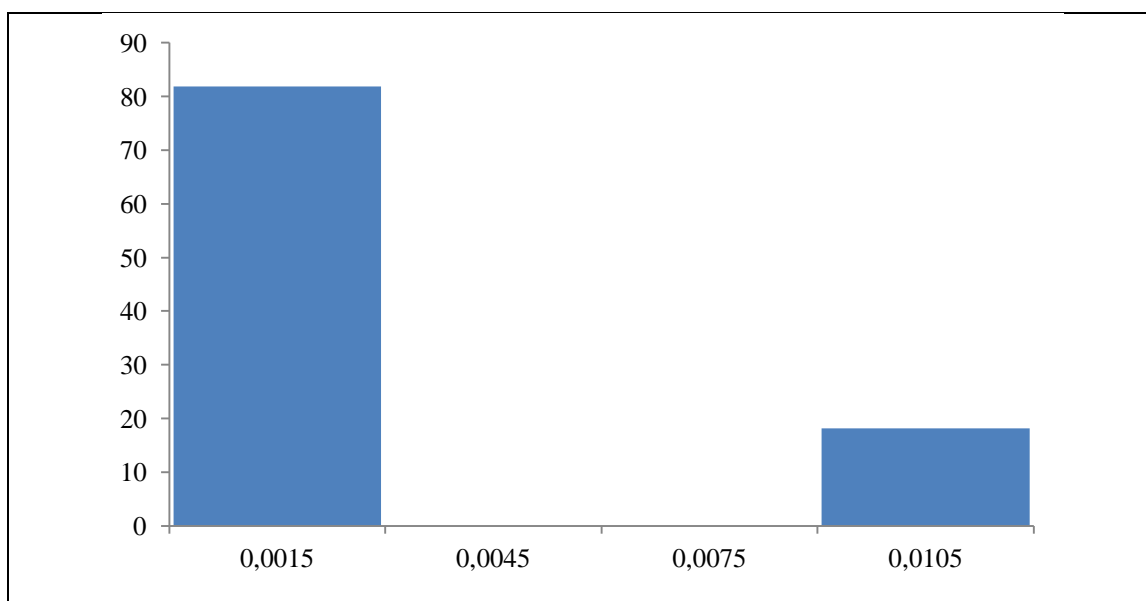
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží		
Vzorek	6ú	
Počet vrstev	6	
výztuže		
Teplota vytvrzení	250	
Vazba výztuže	K 2/2	
Tlak při lisování	5,9	
[MPa]		
Snímání	Útek – podélná vlákna	
Rastrový obraz		
Naměřená data	0,0005	0,001
	0,0007	0,002
	0,001	0,003
	0,001	0,01
	0,001	0,01
	0,001	



Obr. 21 Fibrogram vzorku 6ú

Tab. 23 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

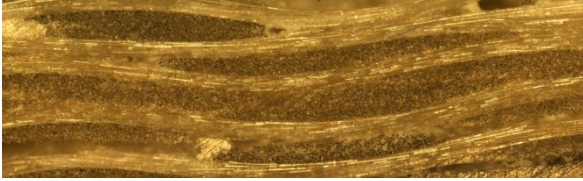
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,0005 - 0,003	0,0015	9	82
2	0,003 - 0,006	0,0045	0	0
3	0,006 - 0,009	0,0075	0	0
4	0,009 - 0,012	0,0105	2	18
Σ			11	100

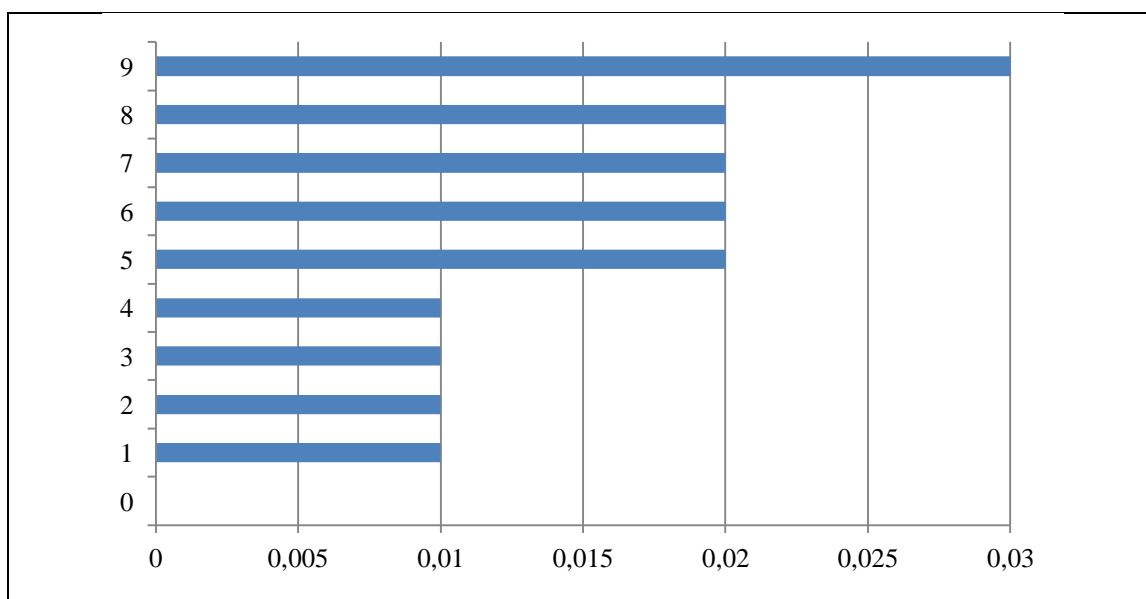


Obr. 22 Histogram vzorku 6ú

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 24 Výsledky měření vzorku číslo 7o

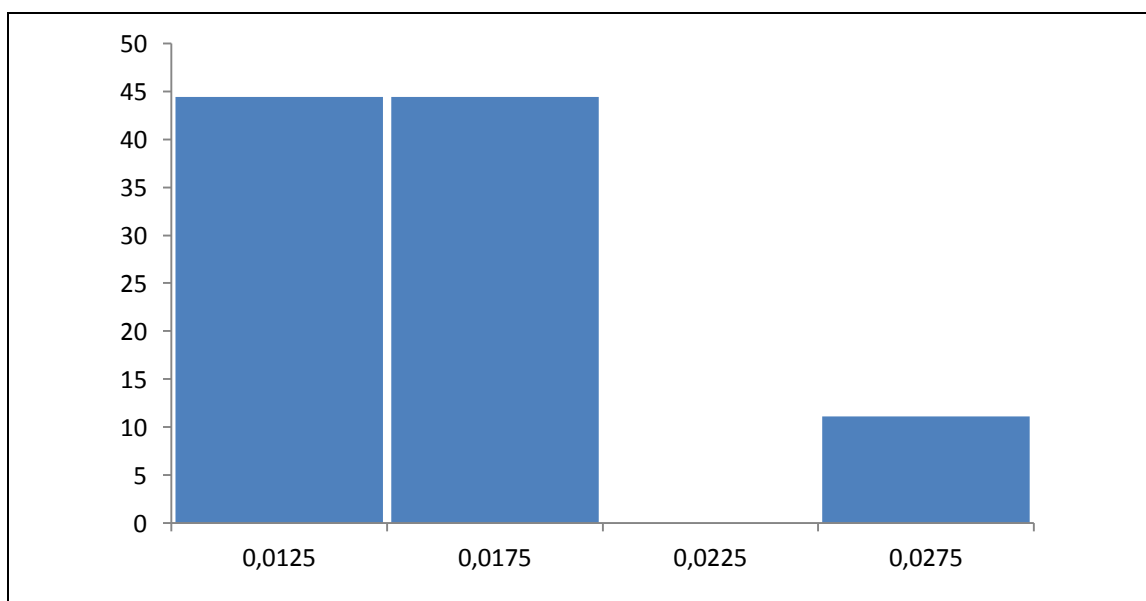
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží	
Vzorek	7o
Počet vrstev výztuže	6
Teplota vytvrzení	200
Vazba výztuže	P
Tlak při lisování [MPa]	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Snímání	Osnova – příčná vlákna
Rastrový obraz	
Naměřená data	0,01 0,01 0,01 0,01 0,02 0,02 0,02 0,02 0,03



Obr. 23 Fibrogram vzorku 7o

Tab. 25 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

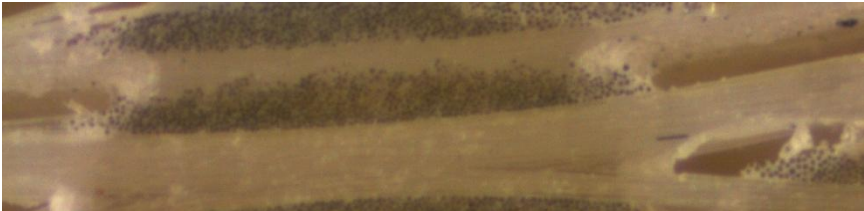
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	$f_j = n_j/n \cdot 100$ [%]
1	0,01 - 0,015	0,0125	4	44
2	0,015 - 0,02	0,0175	4	44
3	0,02 - 0,025	0,0225	0	0
4	0,025 - 0,03	0,0275	1	11
Σ			9	100

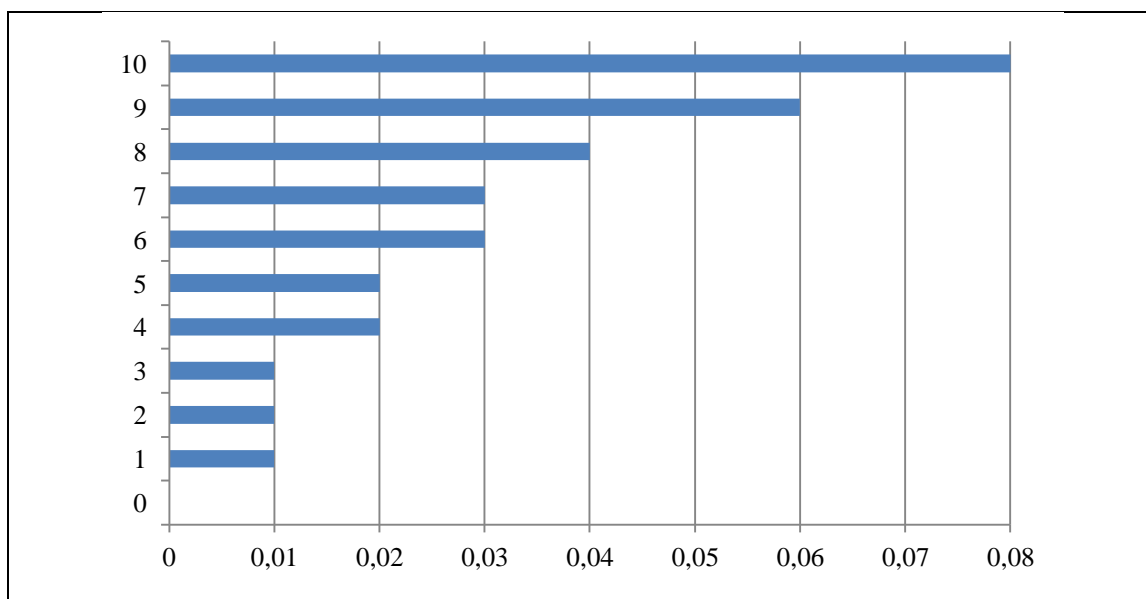


Obr. 24 Histogram vzorku 7o

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 26 Výsledky měření vzorku číslo 7ú

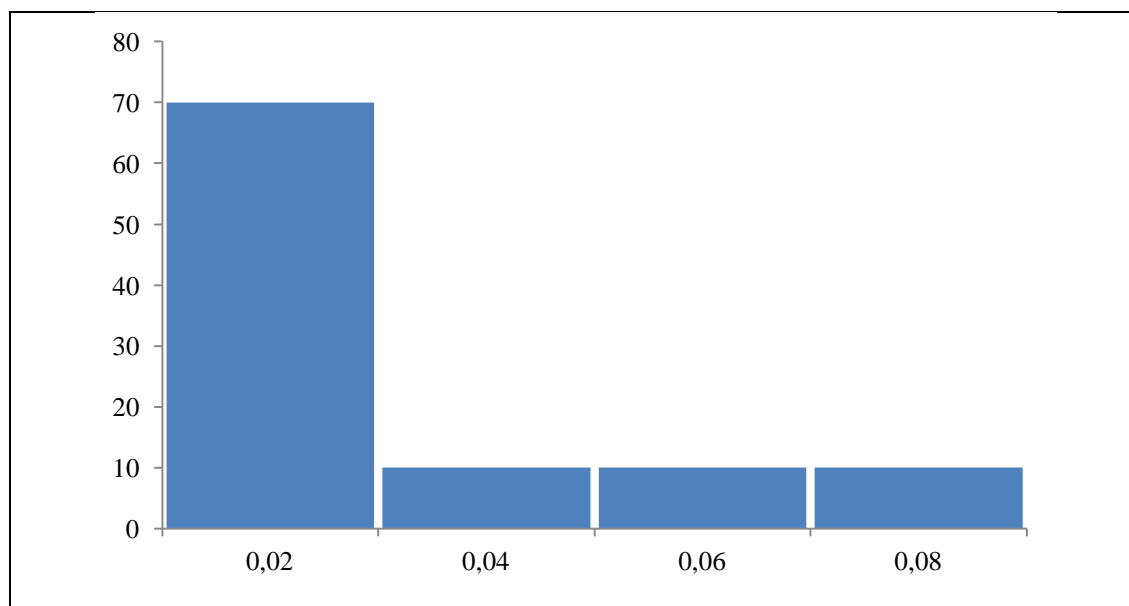
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží		
Vzorek	7ú	
Počet vrstev	6	
výztuže		
Teplota	200	
vytvrzení		
Vazba výztuže	P	
Tlak při	$1,4 \cdot 10^{-2}$	
lisování [MPa]		
Snímání	Útek - podélná vlákna	
Rastrový obraz		
Naměřená data	0,01	0,03
	0,01	0,03
	0,01	0,04
	0,02	0,06
	0,02	0,08



Obr. 25 Fibrogram vzorku 7ú

Tab. 27 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

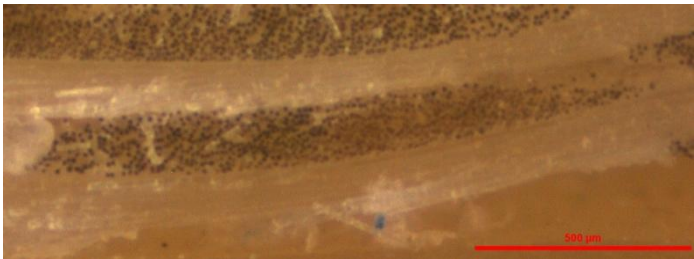
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,01 - 0,03	0,02	7	70
2	0,03 - 0,05	0,04	1	10
3	0,05 - 0,07	0,06	1	10
4	0,07 - 0,09	0,08	1	10
Σ			10	100

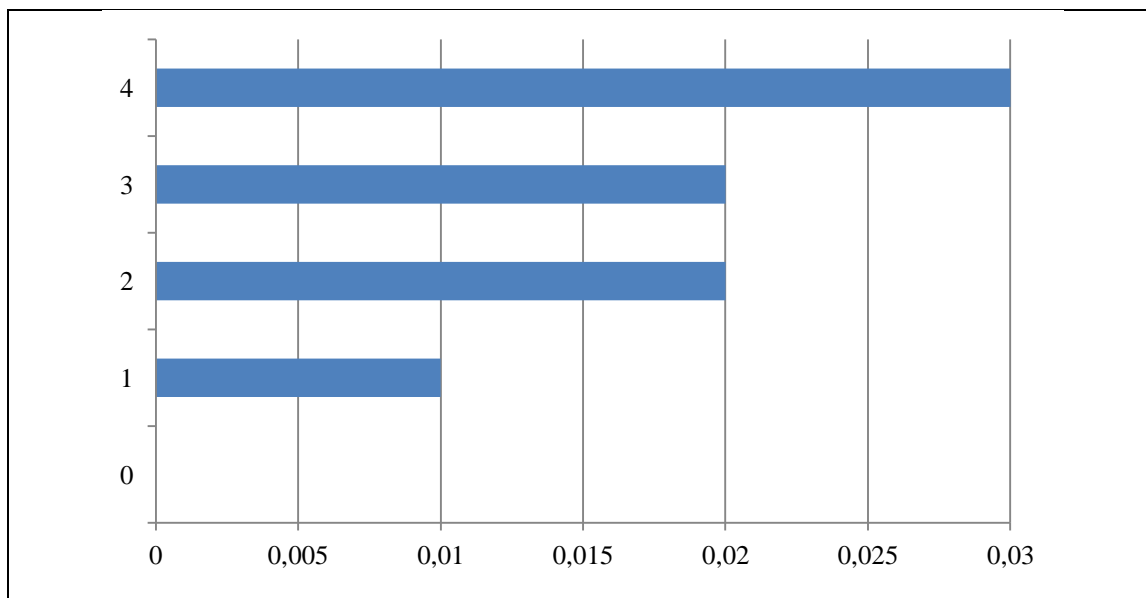


Obr. 26 Histogram vzorku 7ú

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 28 Výsledky měření vzorku číslo 8o

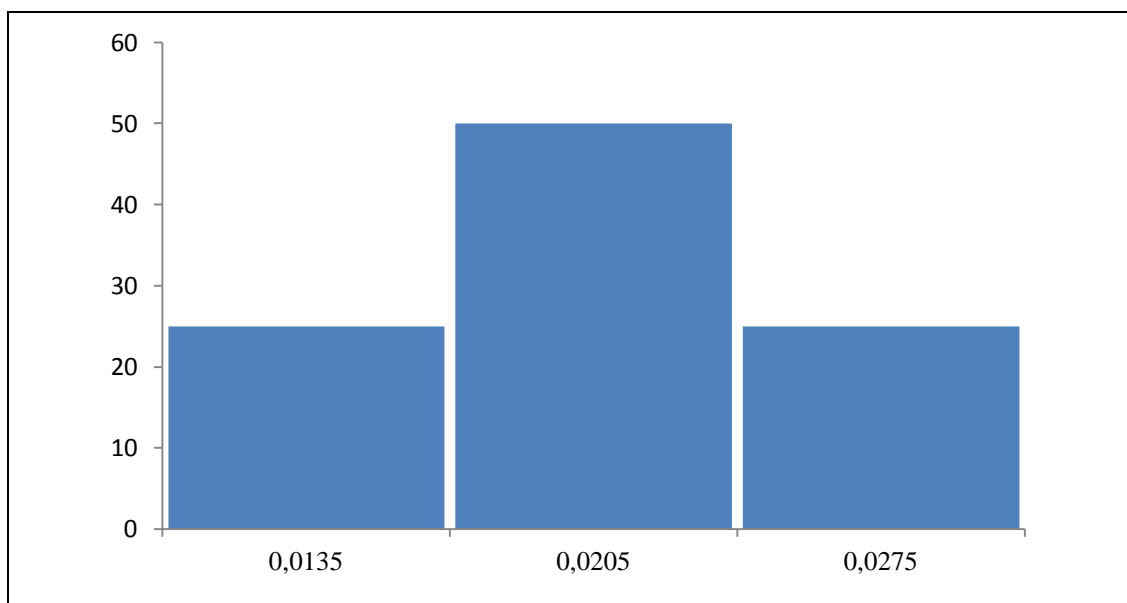
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží	
Vzorek	8o
Počet vrstev výztuže	8
Teplota vytvrzení	200
Vazba výztuže	P
Tlak při lisování [MPa]	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Snímání	Osнова – příčná vlákna
Rastrový obraz	
Naměřená data	0,01 0,02 0,02 0,03



Obr. 27 Fibrogram vzorku 8o

Tab. 29 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

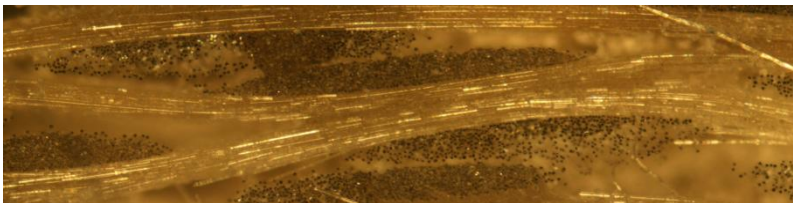
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,01 - 0,017	0,0135	1	25
2	0,017 - 0,024	0,0205	2	50
3	0,024 - 0,031	0,0275	1	25
Σ			4	100

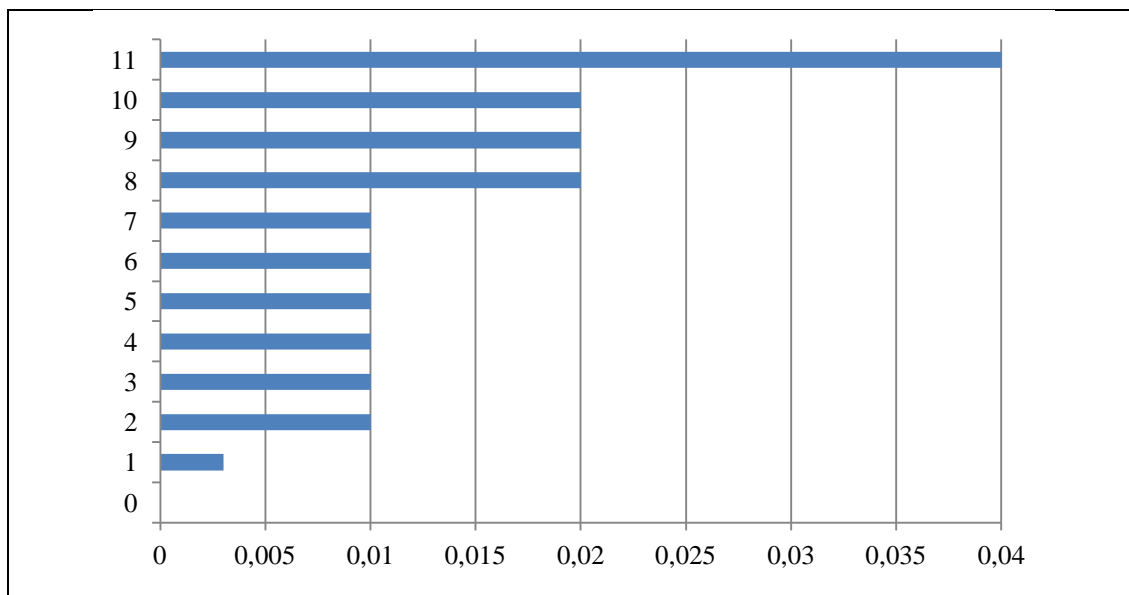


Obr. 28 Histogram vzorku 8o

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 30 Výsledky měření vzorku číslo 8ú

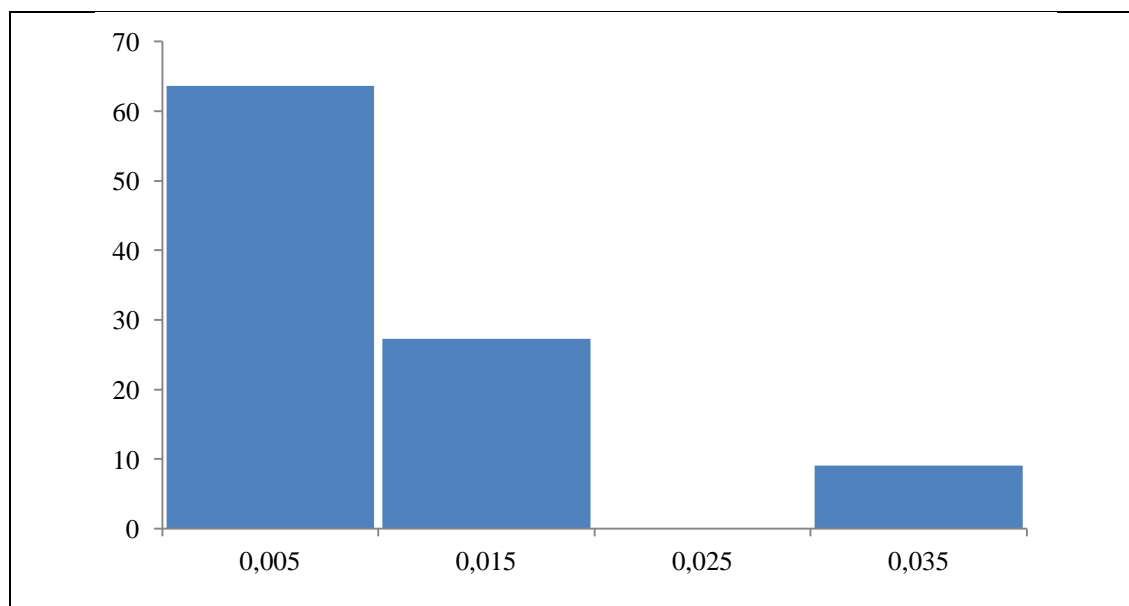
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží		
Vzorek	8ú	
Počet vrstev výztuže	8	
Teplota vytvrzení	200	
Vazba výztuže	P	
Tlak při lisování	$1,4 \cdot 10^{-2}$	
[MPa]		
Snímání	Útek - podélná vlákna	
Rastrový obraz		
Naměřená data	0,003	0,01
	0,01	0,02
	0,01	0,02
	0,01	0,02
	0,01	0,04
	0,01	



Obr. 29 Fibrogram vzorku 8ú

Tab. 31 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

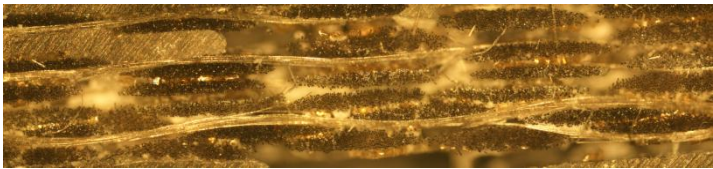
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,003 - 0,01	0,005	7	64
2	0,01 - 0,02	0,015	3	27
3	0,02 - 0,03	0,025	0	0
4	0,03 - 0,04	0,035	1	9
Σ			11	100

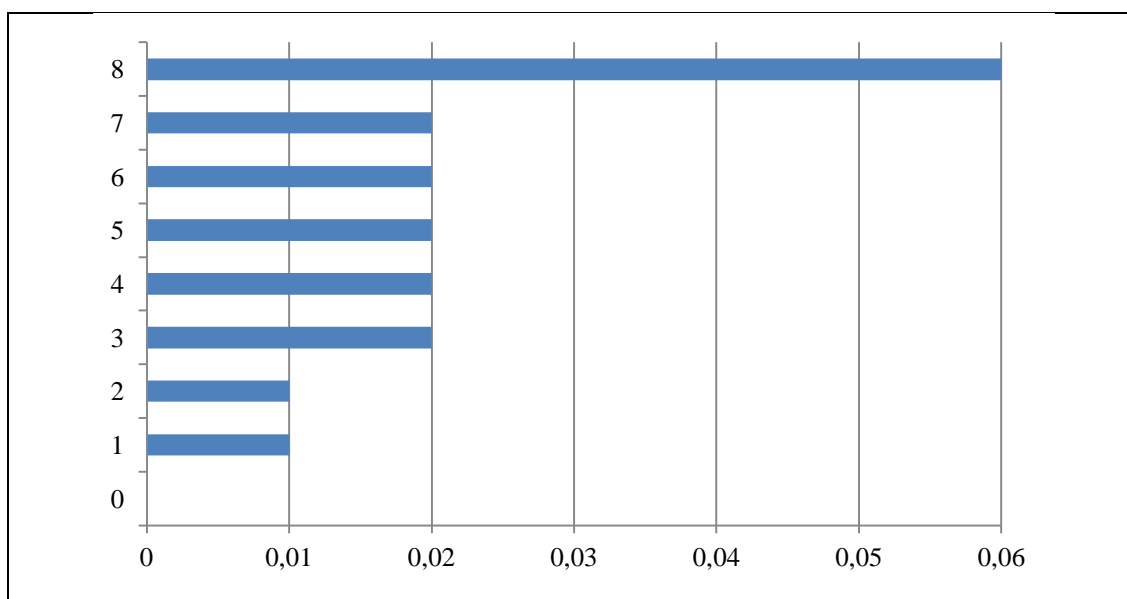


Obr. 30 Histogram vzorku 8ú

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 32 Výsledky měření vzorku číslo 9o

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží	
Vzorek	9o
Počet vrstev výztuže	6
Teplota vytvrzení	600
Vazba výztuže	P
Tlak při lisování [MPa]	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Snímání	Osnova – příčná vlákna
Rastrový obraz	
Naměřená data	0,01
	0,01
	0,02
	0,02
	0,02
	0,02
	0,02
	0,06

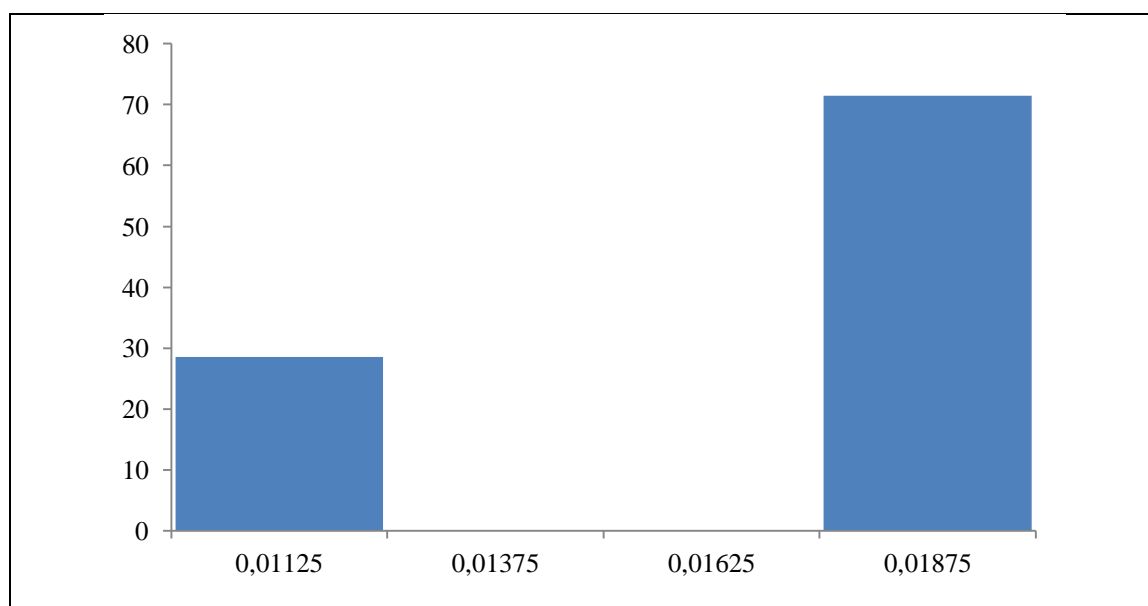


Obr. 31 Fibrogram vzorku 9o

Z fibrogramu bylo zjištěno vybočující měření 0,06, proto bylo vyloučeno z dalšího zpracování.

Tab. 33 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

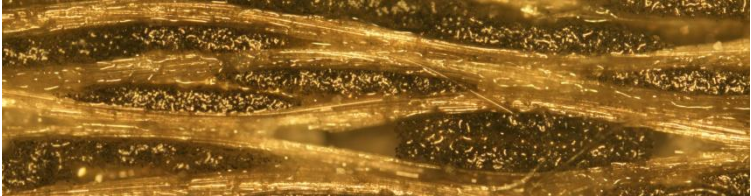
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	$f_j = n_j/n \cdot 100$ [%]
1	0,01 - 0,0125	0,01125	2	29
2	0,0125 - 0,015	0,01375	0	0
3	0,015 - 0,0175	0,01625	0	0
4	0,0175 - 0,02	0,01875	5	71
Σ			7	100

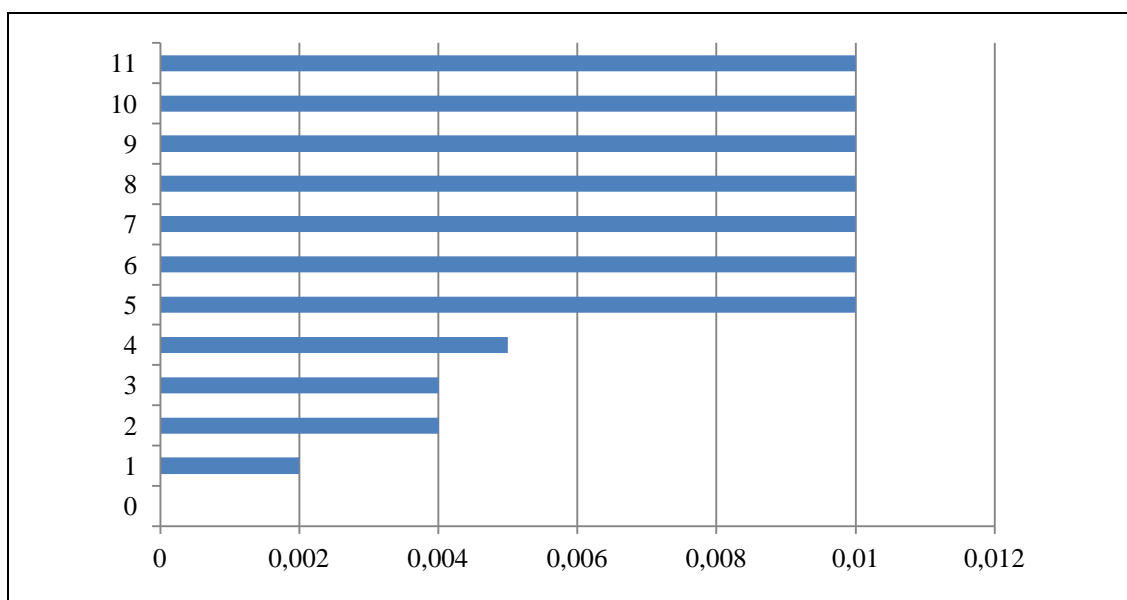


Obr. 32 Histogram vzorku 9o

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 34 Výsledky měření vzorku číslo 9ú

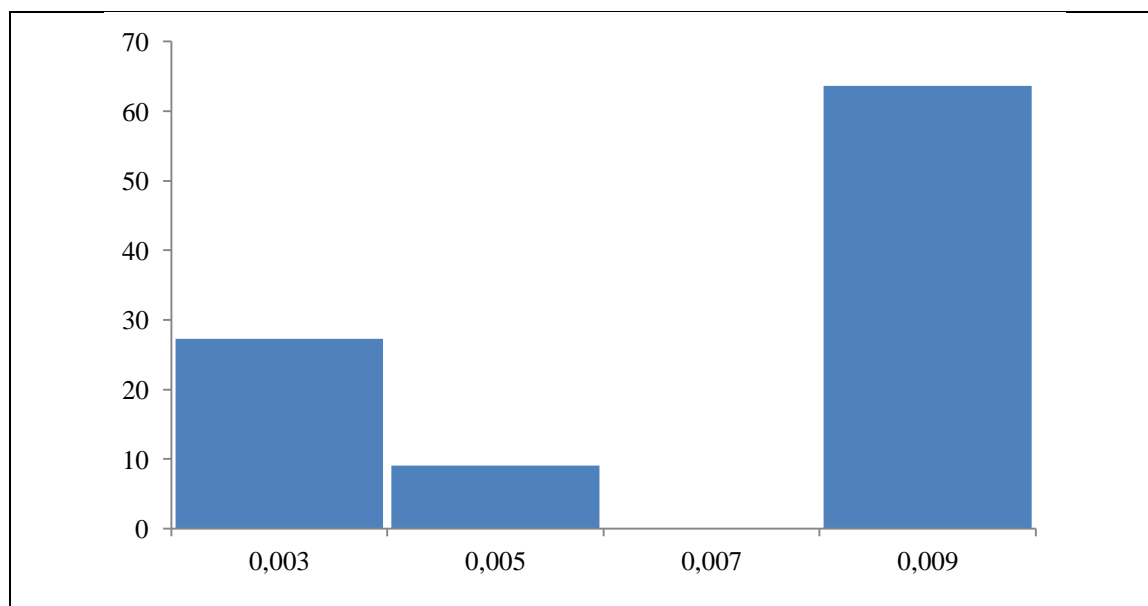
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží		
Vzorek	9ú	
Počet vrstev výztuže	6	
Teplota vytvrzení	600	
Vazba výztuže	P	
Tlak při lisování [MPa]	$1,4 \cdot 10^{-2}$	
Snímání	Útek - podélná vlákna	
Rastrový obraz		
Naměřená data	0,002	0,01
	0,004	0,01
	0,004	0,01
	0,005	0,01
	0,01	0,01
	0,01	



Obr. 33 Fibrogram vzorku 9ú

Tab. 35 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

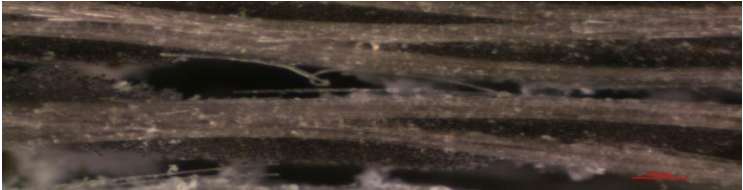
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	$f_j = n_j/n \cdot 100$ [%]
1	0,002 - 0,004	0,003	3	27
2	0,004 - 0,006	0,005	1	9
3	0,006 - 0,008	0,007	0	0
4	0,008 - 0,010	0,009	7	64
Σ			11	100

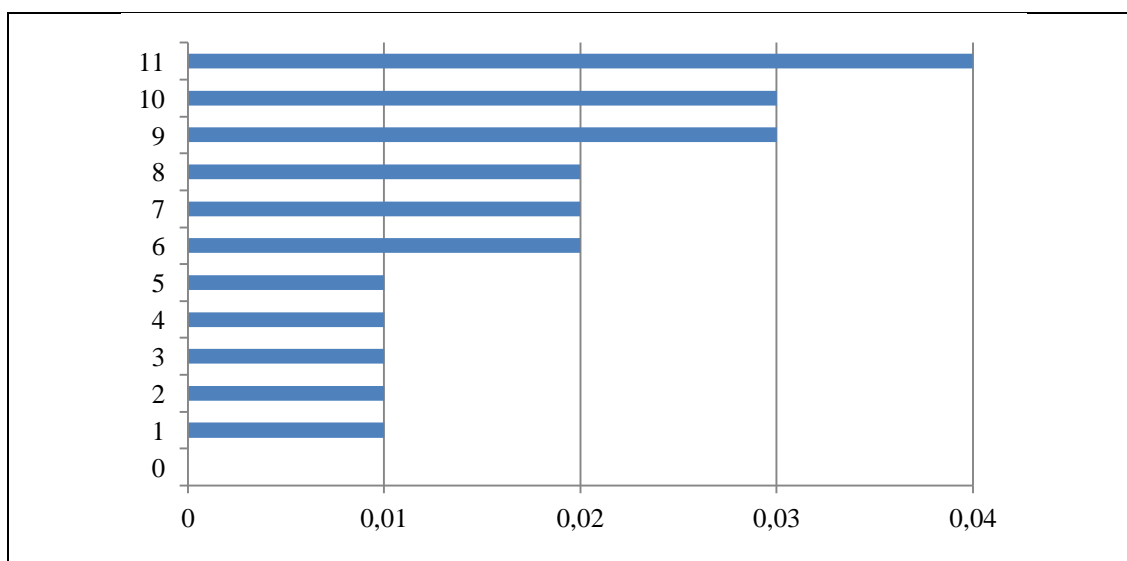


Obr. 34 Histogram vzorku 9ú

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 36 Výsledky měření vzorku číslo 10 o

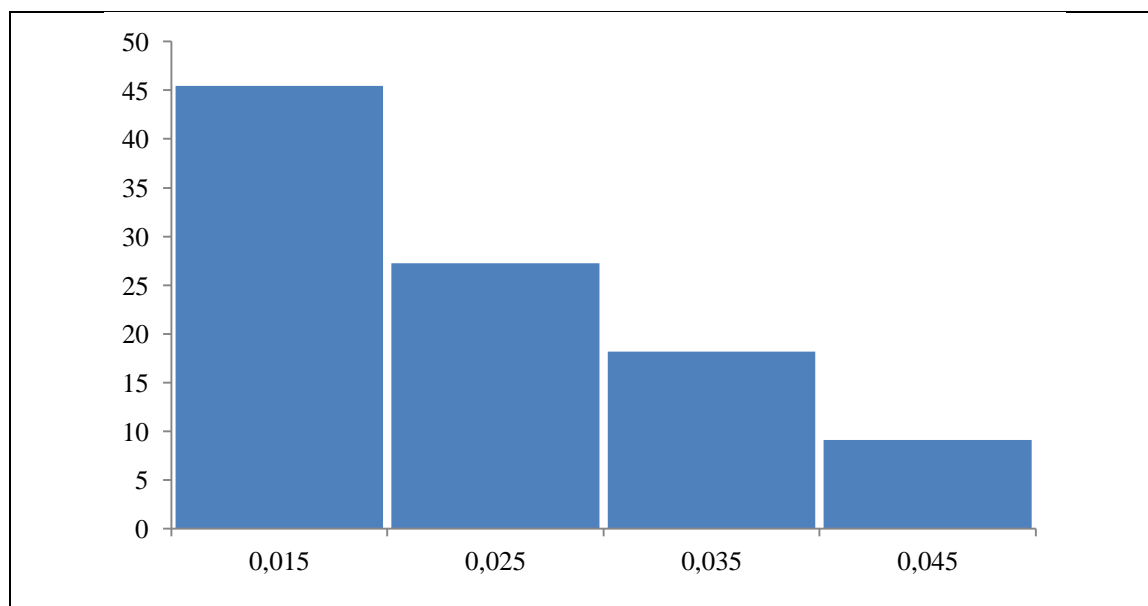
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží	
Vzorek	10 o
Počet vrstev výztuže	8
Teplota vytvrzení	600
Vazba výztuže	P
Tlak při lisování [MPa]	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Snímání	Osnova – příčná vlákna
Rastrový obraz	
Naměřená data	0,01
	0,01
	0,01
	0,01
	0,01
	0,02
	0,02
	0,02
	0,03
	0,03
	0,04



Obr. 35 Fibrogram vzorku 10 o

Tab. 37 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

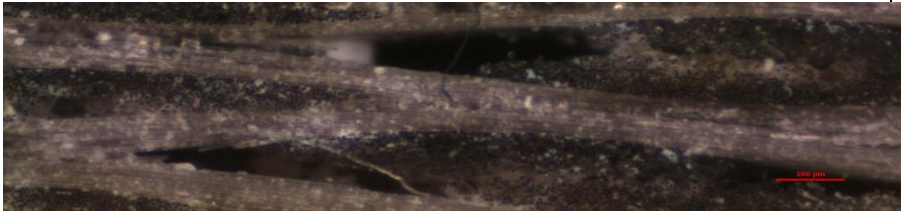
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	$f_j = n_j/n \cdot 100$ [%]
1	0,01 - 0,02	0,015	5	45
2	0,02 - 0,03	0,025	3	27
3	0,03 - 0,04	0,035	2	18
4	0,04 - 0,05	0,045	1	9
Σ			11	100

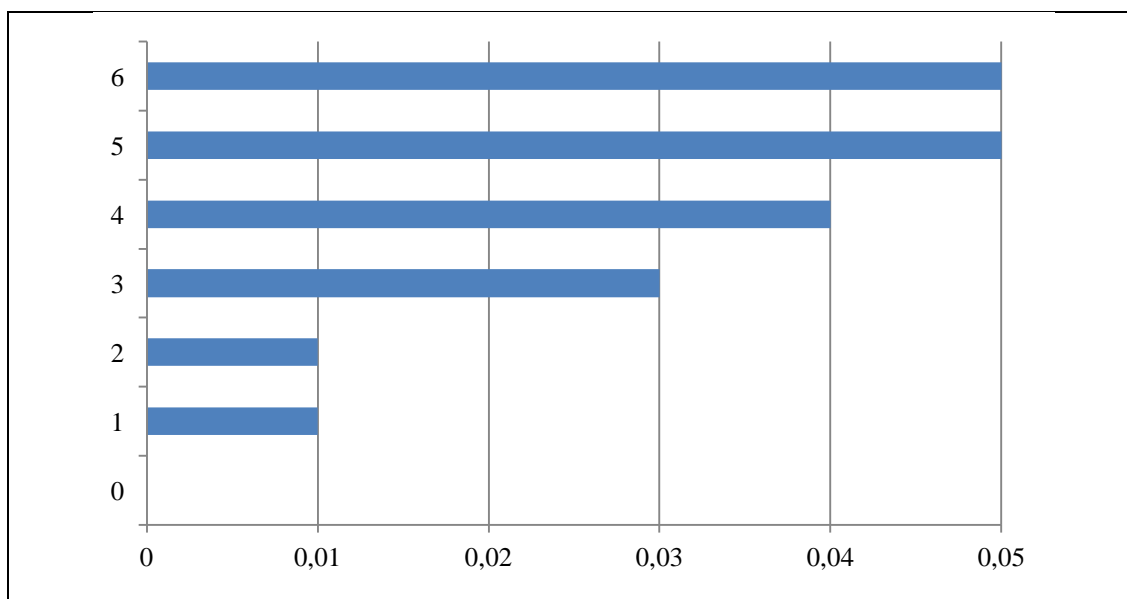


Obr. 36 Histogram vzorku 10 o

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 38 Výsledky měření vzorku číslo 10ú

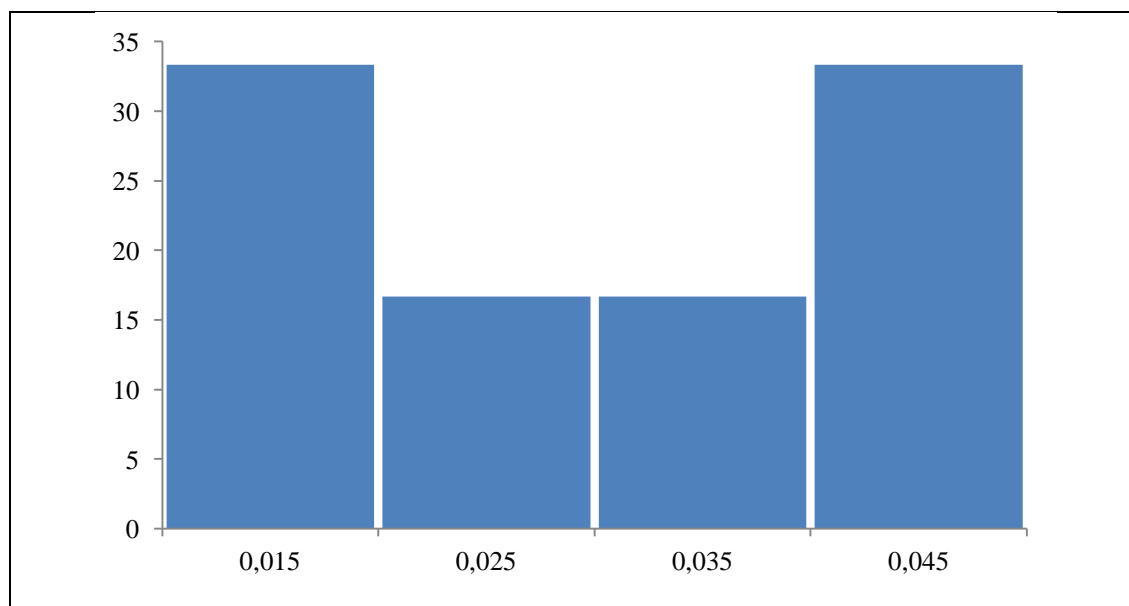
KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží	
Vzorek	10ú
Počet vrstev	8
výztuže	
Teplota	600
vytvrzení	
Vazba výztuže	P
Tlak při	$1,4 \cdot 10^{-2}$
lisování [MPa]	
Snímání	Útek - podélná vlákna
Rastrový obraz	
Naměřená data	0,01 0,01 0,03 0,04 0,05 0,05



Obr. 37 Fibrogram vzorku 10 ú

Tab. 39 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

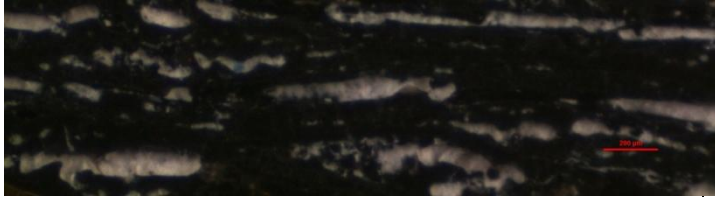
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,01 - 0,02	0,015	2	33
2	0,02 - 0,03	0,025	1	17
3	0,03 - 0,04	0,035	1	17
4	0,04 - 0,05	0,045	2	33
Σ			6	100

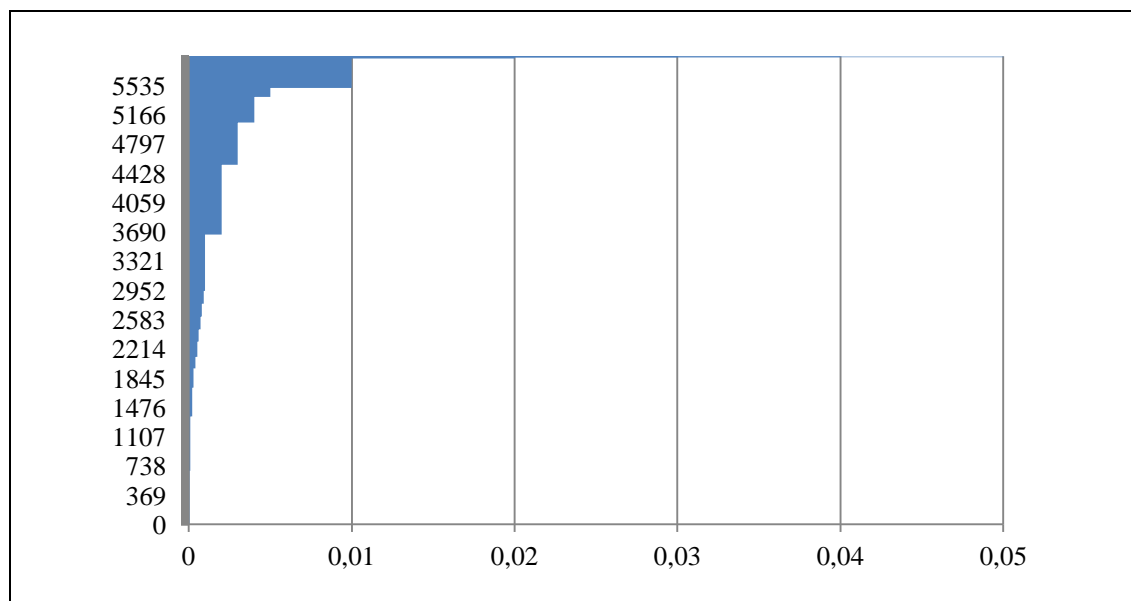


Obr. 38 Histogram vzorku 10 ú

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 40 Výsledky měření vzorku číslo 11 o

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží	
Vzorek	11 o
Počet vrstev výztuže	6
Teplota vytvrzení	1100
Vazba výztuže	P
Tlak při lisování [MPa]	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Snímání	Osнова – příčná vlákna
Rastrový obraz	
Statistické vyhodnocení (celkem 5876 dat):	
Střední hodnota ploch [mm]	0,001786279
Rozptyl [mm ²]	6,09785E-06
Směrodatná odchylka [mm]	0,002469383
Variační koeficient [%]	72,33706944
95% interval spolehlivosti pro střední hodnotu [mm]	(0,001723139; 0,001849)
medián	0,0009



Obr. 39 Fibrogram vzorku 11o

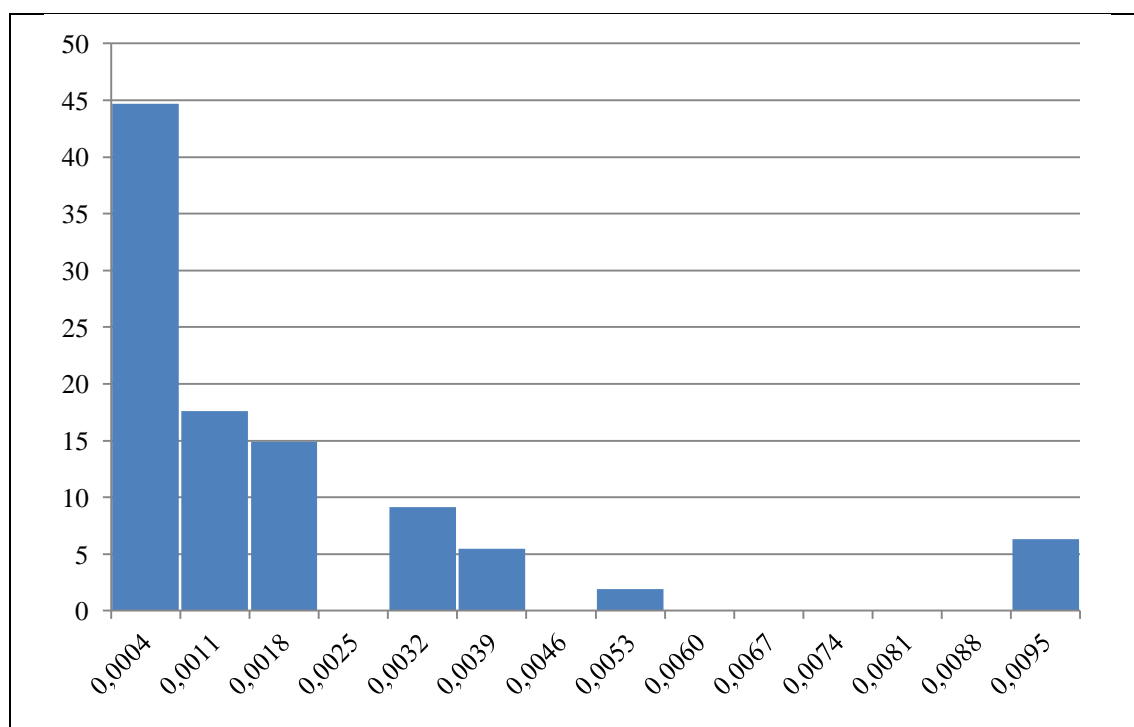
Z fibrogramu byla zjištěna vybočující měření:

1	0,02
2	0,02
3	0,02
4	0,02
5	0,02
6	0,02
7	0,02
8	0,02
9	0,02
10	0,02
11	0,02
12	0,02
13	0,02
14	0,02
15	0,03
16	0,03
17	0,03
18	0,04
19	0,04
20	0,05

celkem 20 dat, proto byla vyloučena z dalšího zpracování.

Tab. 41 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

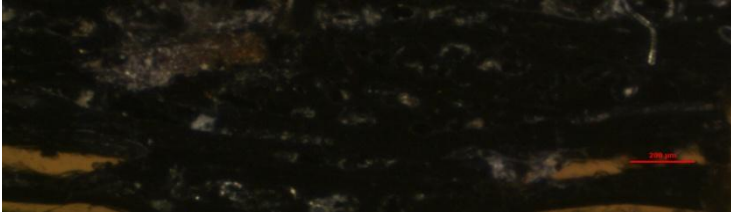
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,000002 - 0,0007	0,0004	2625	45
2	0,0007 - 0,0014	0,0011	1034	18
3	0,0014 - 0,0021	0,0018	875	15
4	0,0021 - 0,0028	0,0025	0	0
5	0,0028 - 0,0035	0,0032	538	9
6	0,0035 - 0,0042	0,0039	321	5
7	0,0042 - 0,0049	0,0046	0	0
8	0,0049 - 0,0056	0,0053	112	2
9	0,0056 - 0,0063	0,0060	0	0
10	0,0063 - 0,007	0,0067	0	0
11	0,0070 - 0,0077	0,0074	0	0
12	0,0077 - 0,0084	0,0081	0	0
13	0,0084 - 0,0091	0,0088	0	0
14	0,0091 - 0,01	0,0095	371	6
Σ			5876	100

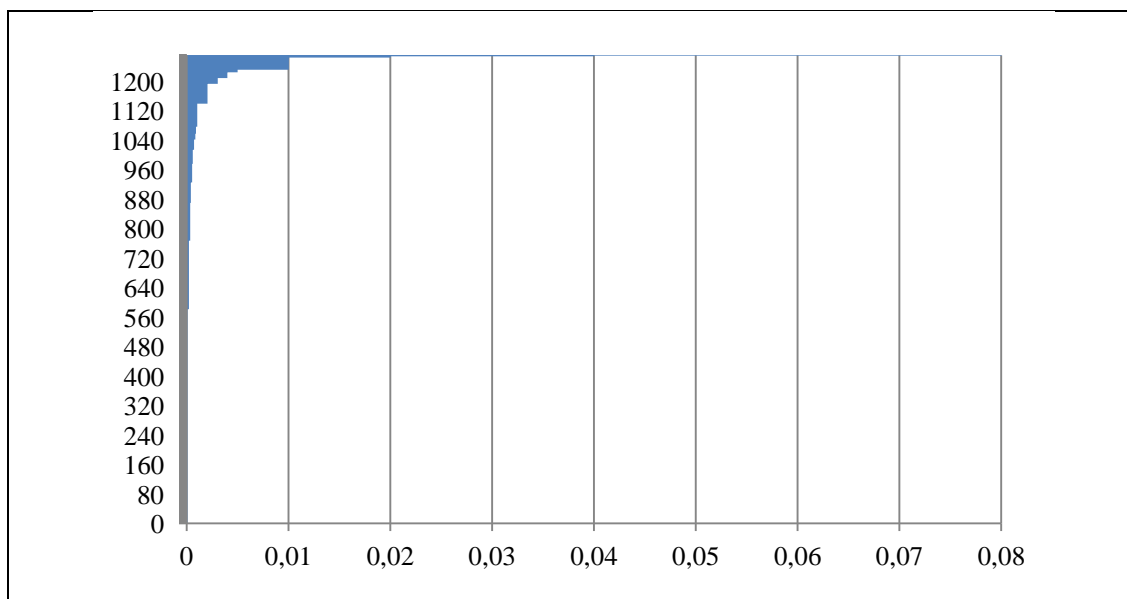


Obr. 40 Histogram vzorku 11 o

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 42 Výsledky měření vzorku číslo 11 ú

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží	
Vzorek	11 ú
Počet vrstev výztuže	6
Teplota vytvrzení	1100
Vazba výztuže	P
Tlak při lisování [MPa]	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Snímání	Útek – podélná vlákna
Rastrový obraz	
Statistické vyhodnocení	
(celkem 1263 dat):	
Střední hodnota ploch [mm]	0,000688379
Rozptyl [mm ²]	2,86781E-06
Směrodatná odchylka [mm]	0,001693461
Variační koeficient [%]	40,64925107
95% interval spolehlivosti pro střední hodnotu [mm]	(0,000595241; 0,000782)
medián	0,0002



Obr. 41 Fibrogram vzorku 11ú

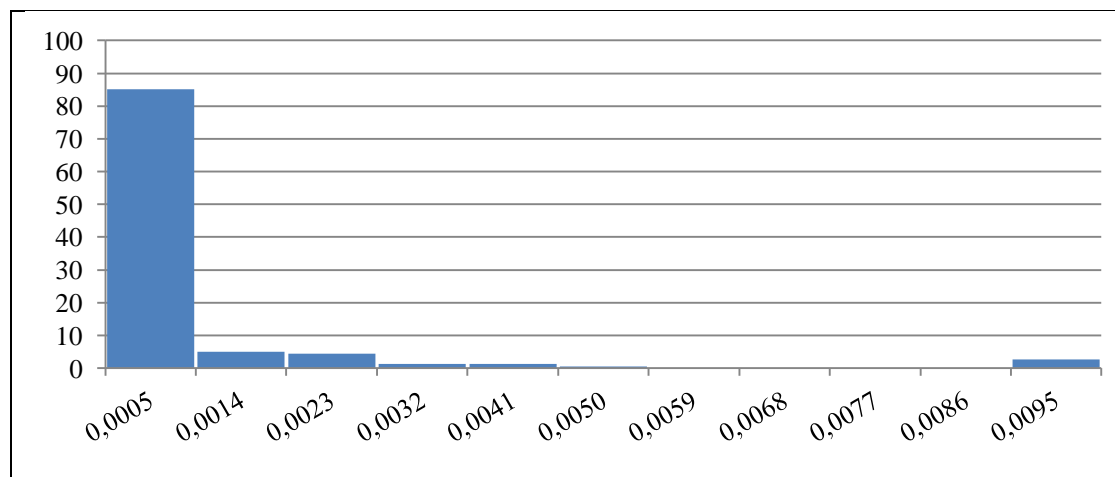
Z fibrogramu byla zjištěna vybočující měření:

1	0,02
2	0,02
3	0,02
4	0,02
5	0,04
6	0,08
7	9,49

celkem 7 dat, proto byla vyloučena z dalšího zpracování.

Tab. 43 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

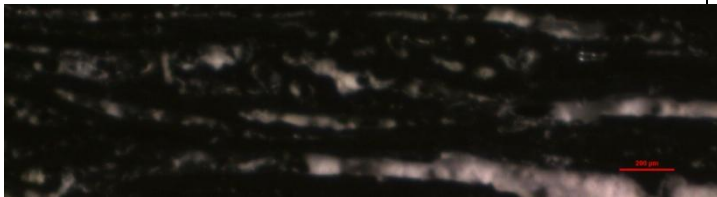
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	Sjd-Sjh [mm]	Sj [mm]	nj	$f_j = n_j/n \cdot 100$ [%]
1	0,000002 - 0,0009	0,0005	1075	85
2	0,0009 - 0,0018	0,0014	63	5
3	0,0018 - 0,0027	0,0023	55	4
4	0,0027 - 0,0036	0,0032	15	1
5	0,0036 - 0,0045	0,0041	16	1
6	0,0045 - 0,0054	0,0050	6	0
7	0,0054 - 0,0063	0,0059	0	0
8	0,0063 - 0,0072	0,0068	0	0
9	0,0072 - 0,0081	0,0077	0	0
10	0,0081 - 0,009	0,0086	0	0
11	0,009 - 0,017	0,0095	33	3
Σ			1263	100

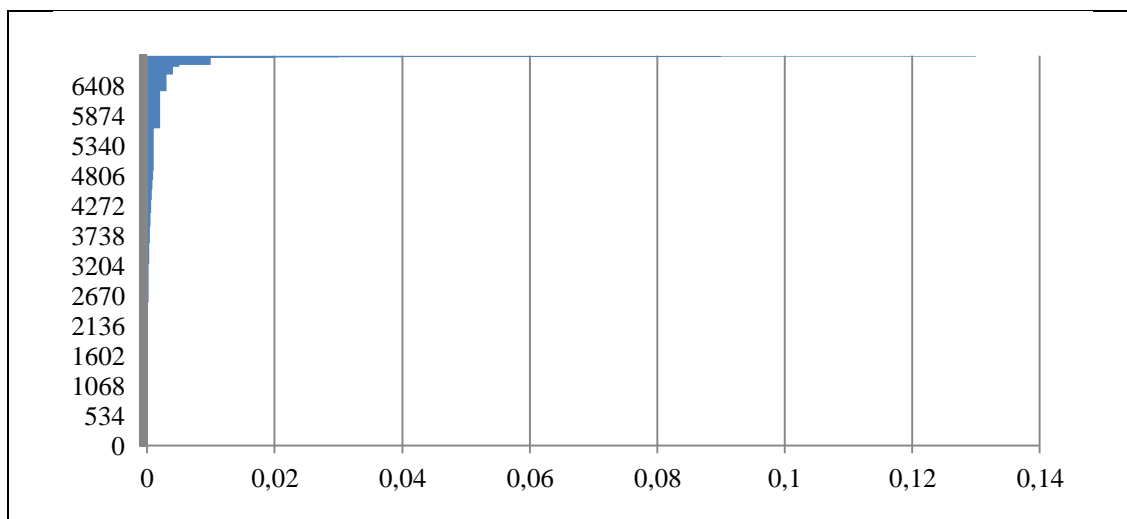


Obr. 42 Histogram vzorku 11 ú

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 44 Výsledky měření vzorku číslo 12 o

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží	
Vzorek	12 o
Počet vrstev výztuže	8
Teplota vytvrzení	1100
Vazba výztuže	P
Tlak při lisování [MPa]	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Snímání	Osnova – příčná vlákna
Rastrový obraz	
Statistické vyhodnocení	
(celkem 6908 dat):	
Střední hodnota ploch [mm]	0,000885411
Rozptyl [mm²]	2,37915E-06
Směrodatná odchylka [mm]	0,001542451
Variační koeficient [%]	57,40288791
95% interval spolehlivosti pro střední hodnotu [mm]	(0,000849037; 0,000922)
medián	0,0003



Obr. 43 Fibrogram vzorku 12 o

Z fibrogramu byla zjištěna vybočující měření:

1	0,02
2	0,02
3	0,02
4	0,02
5	0,02
6	0,02
7	0,02
8	0,02
9	0,02
10	0,02
11	0,03
12	0,03
13	0,03
14	0,03
15	0,03
16	0,04
17	0,04
18	0,04
19	0,04
20	0,04
21	0,04

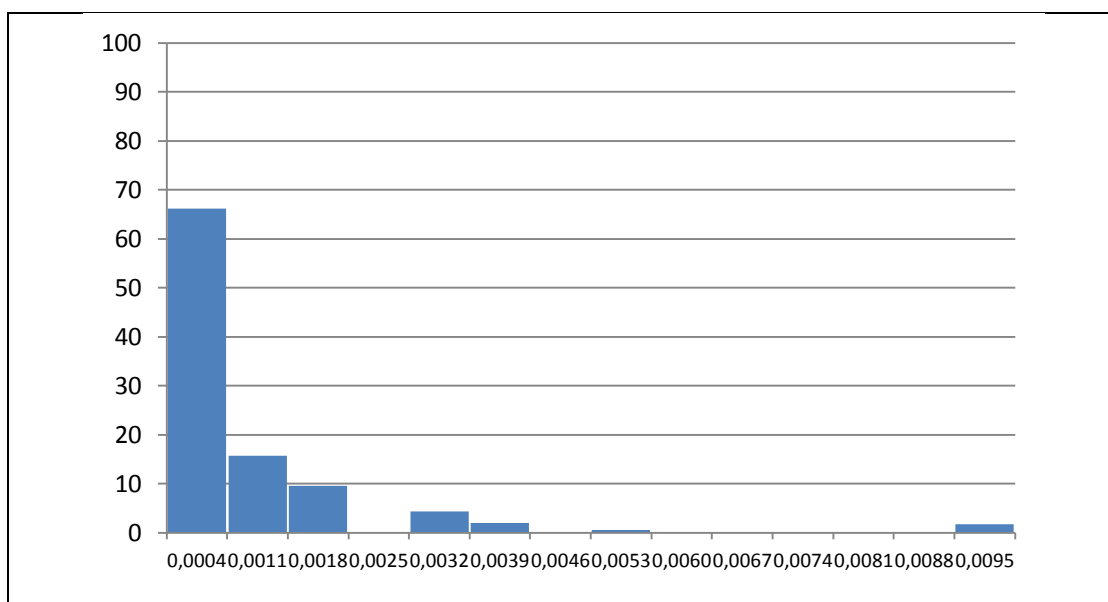
22	0,04
23	0,04
24	0,04
25	0,04
26	0,05
27	0,06
28	0,07
29	0,07
30	0,09
31	0,13

celkem 31 dat, proto byla vyloučena z dalšího zpracování.

Tab. 45 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,000002 - 0,0007	0,0004	4571	66
2	0,0007 - 0,0014	0,0011	1085	16
3	0,0014 - 0,0021	0,0018	659	10
4	0,0021 - 0,0028	0,0025	0	0
5	0,0028 - 0,0035	0,0032	295	4
6	0,0035 - 0,0042	0,0039	138	2
7	0,0042 - 0,0049	0,0046	0	0
8	0,0049 - 0,0056	0,0053	40	1
9	0,0056 - 0,0063	0,0060	0	0
10	0,0063 - 0,0070	0,0067	0	0
11	0,0070 - 0,0077	0,0074	0	0
12	0,0077 - 0,0084	0,0081	0	0

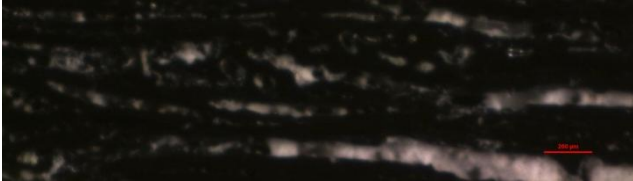
číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	Sjd-Sjh [mm]	Sj [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
13	0,0084 - 0,0091	0,0088	0	0
14	0,0091 - 0,01	0,0095	120	2
Σ			6908	100

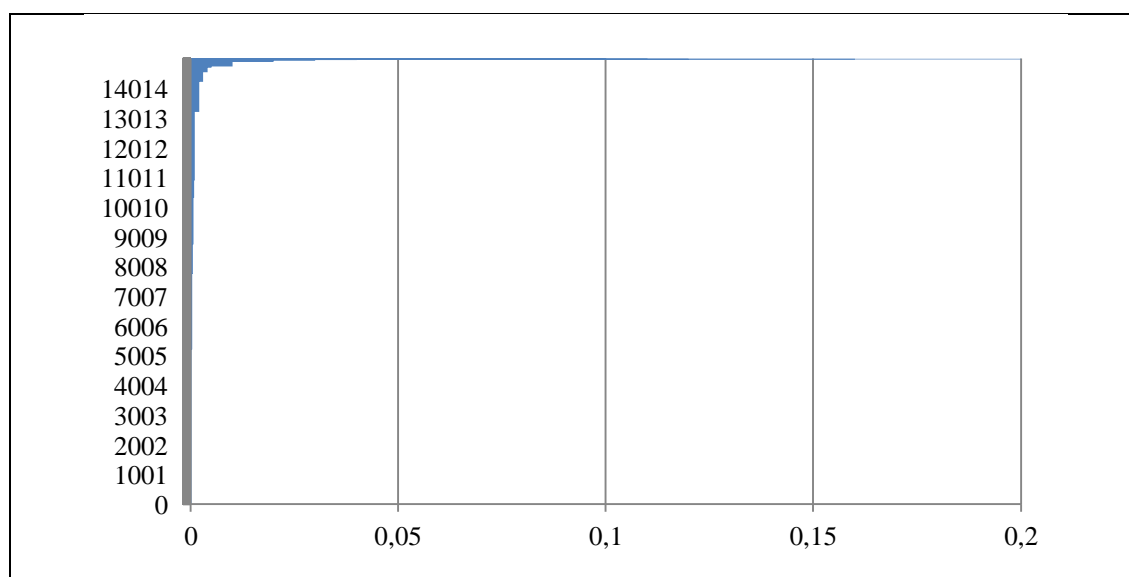


Obr. 44 Histogram vzorku 12 o

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.

Tab. 46 Výsledky měření vzorku číslo 12 ú

KOMPOZIT s tkaninovou skleněnou výztuží	
Vzorek	12 ú
Počet vrstev výztuže	8
Teplota vytvrzení	1100
Vazba výztuže	P
Tlak při lisování [MPa]	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Snímání	Útek – podélná vlákna
Rastrový obraz	
Statistické vyhodnocení (celkem 14924 dat):	
Střední hodnota ploch [mm]	0,000738511
Rozptyl [mm ²]	1,43843E-06
Směrodatná odchylka [mm]	0,001199347
Variační koeficient [%]	61,57603674
95% interval spolehlivosti pro střední hodnotu [mm]	(0,000719325; 0,000758)
medián	0,0004

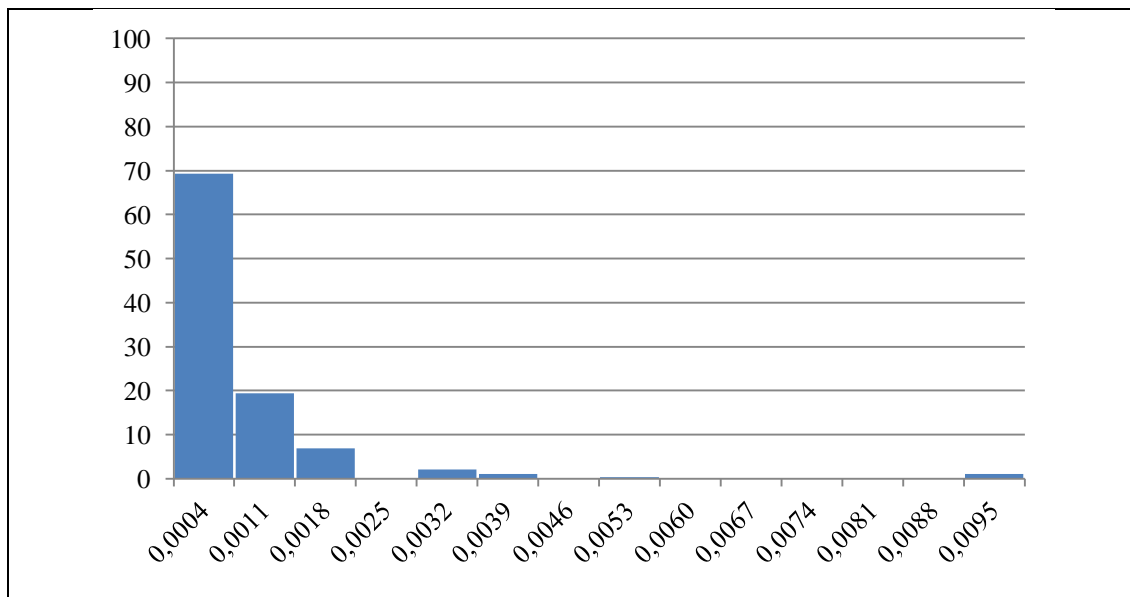


Obr. 45 Fibrogram vzorku 12 ú

Z fibrogramu byla zjištěna vybočující měření od 0,02 až 0,2 (celkem 98 dat), která nejsou zahrnuta v histogramu.

Tab. 47 Rozdělení naměřených dat do tříd četnosti

číslo třídy četnosti	Třída četnosti	Střed třídy	Počet dat ve třídě	Relativní četnost
j	S _{jd} -S _{jh} [mm]	S _j [mm]	n _j	f _j = n _j /n*100 [%]
1	0,000002 - 0,0007	0,0004	10338	69
2	0,0007 - 0,0014	0,0011	2890	19
3	0,0014 - 0,0021	0,0018	1032	7
4	0,0021 - 0,0028	0,0025	0	0
5	0,0028 - 0,0035	0,0032	317	2
6	0,0035 - 0,0042	0,0039	155	1
7	0,0042 - 0,0049	0,0046	0	0
8	0,0049 - 0,0056	0,0053	39	0
9	0,0056 - 0,0063	0,0060	0	0
10	0,0063 - 0,007	0,0067	0	0
11	0,007 - 0,0077	0,0074	0	0
12	0,0077 - 0,0084	0,0081	0	0
13	0,0084 - 0,0091	0,0088	0	0
14	0,0091 - 0,01	0,0095	153	1
Σ			14924	100



Obr. 46 Histogram vzorku 12 ú

Histogram ploch pórů v kompozitu neodpovídá křivce Gaussova rozdělení.